



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Bruno Moura Miranda

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO DE MOLDAGEM POR
TRANSFERÊNCIA DE RESINA PARA USO LABORATORIAL**

CAMPINA GRANDE / PB

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Bruno Moura Miranda

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO DE MOLDAGEM POR
TRANSFERÊNCIA DE RESINA PARA USO LABORATORIAL**

Este trabalho corresponde à dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

ORIENTADOR: Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

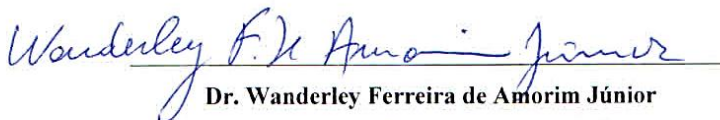
CAMPINA GRANDE / PB

2015

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO DE MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA PARA USO LABORATORIAL

BRUNO MOURA MIRANDA

Dissertação aprovada em 27 de Fevereiro de 2015, pela banca examinadora
constituída dos seguintes membros:



Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Orientador

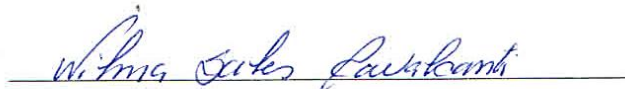
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Eisenhower de Moura Fernandes

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dra. Wilma Sales Cavalcanti

Examinadora Externa

LCTF/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Sebastião Araújo Coutinho

Examinador Externo

SUNA ENGENHARIA

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M672d Miranda, Bruno Moura.

Desenvolvimento de um equipamento de moldagem por transferência de resina para uso laboratorial / Bruno Moura Miranda. – Campina Grande, 2015.
200 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.

"Orientação: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior".
Referências.

1. Moldagem por Transferência de Resina. 2. Placas Compósitas. 3. Estações de Processamento. 4. Placas de Pequena Área. 5. Placas de Grande Área. I. Amorim Júnior, Wanderley Ferreira de. II. Título.

CDU 621.01(043.3)

À minha família, pelo suporte de uma vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me honrar nos momentos mais difíceis. Obrigado, meus pais Emmanuel Miranda e Rosimar Socorro Miranda, pelos ensinamentos, cuidados e amor a mim dispensados em todos esses anos. Aos meus irmãos, Rodrigo Augusto Miranda, Rafael Miranda e Eduarda Miranda, por sempre se fazerem presentes e me apoiarem nos meus desafios. À minha namorada Bianca Mandetta, que me ajudou de inúmeras formas, por sua paciência, carinho e zelo.

Quanto ao ensino, não posso deixar de agradecer aos mestres que me acompanharam nessa trajetória e que sempre me inspiraram, nas pessoas dos professores Dr. Juscelino Marimbondo, Dr. Wanderley Amorim Júnior. Que Deus conserve seu dom de ser além de professores, amigos e fonte de inspiração para jovens profissionais como eu.

Aos companheiros de trabalho durante os dois anos de intenso trabalho dentro do LPI-UFCG com os quais tive a oportunidade de compartilhar ideias e dividir conhecimentos. Francisco Fernando Pereira com quem muito aprendi o sentido de responsabilidade e compromisso. Com Diego Diniz pelo auxílio e companheirismo de sempre.

À todas as pessoas que a mim mandaram incentivos e que me ajudaram de alguma forma nessa jornada, principalmente nos últimos meses, onde o peso de um trabalho como este se apresentou na sua forma mais enfática.

Em especial, dedico este trabalho aos meus avós *In Memoriam* Manoel Miranda, Elza Miranda, e com muito carinho e profundo amor, por todo o zelo, carinho, cuidado, à minha tia Inês Moura, minha avó Guigüia e ao meu avô João Felinto Filho *In memoriam*, que me inspirou e ainda o faz, na minha carreira profissional.

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO DE MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA PARA USO LABORATORIAL

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um equipamento de injeção de resina para processar compósitos via moldagem por transferência de resina de uso laboratorial. Foi cumprida a seguinte metodologia: concepção, fabricação e testes no equipamento, testes de injeção nas estações de processamento, fabricação de placas compósitas e posterior caracterização. Os materiais utilizados nos experimentos foram: Manta de fibra de vidro (450g/m^2), tecido básico de fibra de vidro (600 g/m^2) e resina poliéster insaturada ortofitálica de média viscosidade *Arazyn 1.0 #08 Ara Ashland*® e catalisador Butanox 50. Foram produzidas placas de pequena área, com dimensões de: $175 \times 125 \times 5\text{mm}$ e de grande área, com dimensões de: $340 \times 340 \times 5\text{mm}$. Baseado nos experimentos resultados, conclui-se que foi possível o projeto, desenvolvimento e fabricação de um equipamento de injeção de resina por RTM de uso laboratorial, de baixo custo, com baixas perdas energéticas, para fabricação de compósitos com reforço dos tipos: manta e tecido, com diferentes gramaturas e pequena espessura.

Palavras-chave: Moldagem por Transferência de Resina; Placas Compósitas; Estações de Processamento; Placas de Pequena Área; Placas de Grande Área.

DESIGN OF A LABORATORIAL RESIN TRANSFER MOULDING EQUIPMENT

The objective of this work was design a laboratorial Resin Transfer Moulding Equipment to process composites. The following methodology was fulfilled: Design and manufacture of the equipment, testing its process capabilities, injection tests in the processing stations, manufacturing of composite plates and further characterization. The materials used in the experiments were glass fiber mat (450g / m²), base glass fiber fabric (600 g / m²), a medium viscosity 1.0 Arazyn Ara Ashland ® # 08 unsaturated polyester resin and 50 Butanox. Small and large area plates were produced with dimensions of: 175x125x5mm and 340x340x5mm respectively. Based on the experiments results, it is concluded that it was possible the design, development and manufacture of a resin injection equipment RTM for laboratory use with low cost and low energy losses, for the manufacture of composites with two reinforcement kind: mat and fabric, with different weights and thin.

Keywords: Resin Transfer Moulding; Composite Plates; Processing Station; Small Area Plates; Large Area Plates.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	22
2.1. Objetivo Geral	22
2.2. Objetivos Específicos	22
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1. MATERIAIS COMPÓSITOS	23
3.1.1. Classificação dos Materiais Compósitos	26
3.2. PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	28
3.2.1. Processamento via Moldagem por Transferência de Resina - RTM	29
3.3. INJETORES DE RESINA VIA RTM COM BASE EM SUAS VARIAÇÕES DE PARÂMETROS DE PROCESSO	32
3.3.1. Pressão Negativa / Pressão Negativa + Pressão Positiva	33
3.3.2. Pressão Positiva	35
3.3.3. Pressão Negativa + Pressão Positiva	43
3.4. RESINAS POLIMÉRICAS TERMOFIXAS	44
3.4.1. Resinas mais Utilizadas para Fabricação de Compósitos	44
3.5. CURA DE MATRIZES TERMOFÍXAS	47
3.6. REFORÇO FIBROSO	48
3.7. MOLDE	51
3.8. PERDA DE CARGA	54
4. MATERIAIS E MÉTODOS	57
4.1. MATERIAIS	57
4.2. MÉTODOS	58
4.2.1. Metodologia de Projeto Utilizada para o Desenvolvimento do Equipamento	58
4.2.2. Projeto e Fabricação do Suporte para Estudo do Escoamento no Molde	60
4.2.3. Metodologias de Avaliação da Estação de Processamento por RTM	61
4.2.4. Metodologias de Avaliação das Placas Produzida por RTM	68
4.3. FLUXOGRAMA DO PROJETO	78
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
5.1. PROJETO INFORMACIONAL DO EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO DE RESINA RTM	79
5.1.1. Composite Integration Ciject™ ZERO	79
5.1.2. Composite Integration Ciject™ ONE	81

5.1.3.	Magnum Venus Plastech™ Innovator Pro	82
5.1.4.	GlasCraft® Spartan III	84
5.1.5.	Pistão de Injeção da ISOJET® Equipements	85
5.1.6.	Radius® 2100cc Pneumatic RTM Injection System	86
5.1.7.	Levantamento da Pressão de Injeção em Equipamentos de Injeção de Resina via RTM	93
5.2.	PROJETO CONCEITUAL DO EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO DE RESINA VIA RTM	95
5.2.1.	Subsistema Bomba de Solução Fluida	95
5.2.2.	Subsistema Estrutural do Equipamento	99
5.2.3.	Subsistema Acionamento	102
5.2.4.	Subsistema Misturador	104
5.2.5.	Subsistema de Descarga	106
5.2.6.	Subsistema Transporte Bomba-Molde	109
5.2.7.	Subsistema de Controle e Aquisição	112
5.2.8.	Concepções	112
5.3.	PROJETO PRELIMINAR	117
5.3.1.	Subsistema de Acionamento	117
5.3.2.	Subsistema Bomba de Solução Fluida	119
5.3.3.	Subsistema Estrutura	123
5.3.4.	Transporte Bomba-Molde	126
5.3.5.	Subsistema Controle e Aquisição	126
5.4.	PROJETO DETALHADO	128
5.5.	FABRICAÇÃO	128
5.6.	TESTES	130
5.6.1.	Verificação Inicial	131
5.6.2.	Força de Avanço Experimental do Cilindro Pneumático	133
5.6.3.	Velocidade de Avanço do Pistão	137
5.6.4.	Pressão Máxima de Injeção	141
5.7.	PROJETO DO MOLDE	142
5.7.1.	Definição dos Requisitos	142
5.7.2.	Concepção	143
5.8.	Testes de Processamento com Estações Desenvolvidas no Laboratório de Projeto de Instrumentos (LPI)	147
5.8.1.	Teste de Pequena Área	149

5.8.2.	Teste de Grande Área.....	151
5.9.	Caracterização Mecânica	158
5.9.1.	Ensaio de Tração.....	158
5.9.2.	Ensaio de Flexão	161
5.10.	ESTUDO DA VELOCIDADE DE PREENCHIMENTO NO MOLDE.....	164
5.10.1.	Velocidade Média de Avanço em x e em y Tomadas no Ponto de Injeção 164	
6.	CONCLUSÕES.....	166
7.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	168
8.	REFERÊNCIAS	169
9.	ANEXOS.....	174

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Porcentagem no Peso da Estrutura.	21
Figura 2 - Gráfico da evolução dos materiais de engenharia ao longo do tempo.....	24
Figura 3 - Tubeira de compósito carbono-carbono.....	25
Figura 4 – Classificação dos materiais compósitos.....	27
Figura 5 – Métodos de Processamento de Materiais compósitos	28
Figura 6 – Esquema representativo do processo RTM	30
Figura 7 – Aplicação do processo RTM	31
Figura 8 – Equipamentos de injeção de resina via RTM	33
Figura 9 - Equipamento utilizado no processo VARTM: a) Reservatório de resina e molde; b) molde em processo de preenchimento; c) Bomba de vácuo.....	34
Figura 10 - Trap na saída de ar de um molde	35
Figura 11 - Equipamento utilizado no processo RTM Típico: a) Processo RTM típico; b) Molde e conexões; c) Equipamento de injeção de resina	36
Figura 12 - Equipamento utilizado no processo RTM Típico e seus sistemas	37
Figura 13 - Processos de Mistura de Catalisador e Resina	39
Figura 14 - Processo e Equipamentos do HP-RTM: a) Processo; b) Molde e conexões; c) Equipamento de injeção de resina	40
Figura 15 - Equipamento utilizado no processo HP-CRTM: a) Processo; b) Molde e conexões; c) Equipamento de injeção de resina.	41
Figura 16 - Equipamento utilizado no processo CRTM: a) Processo; b) Molde e conexões; c) Equipamento de injeção de resina.	42
Figura 17 - Equipamentos utilizados no processo CRTM: a) Processo; b) Bomba de vácuo; c) Molde e conexões; d) Equipamento de injeção de resina.....	43
Figura 18 - Macromolécula de poliéster	45
Figura 19 - Representação de uma molécula epóxi DGEBA	46
Figura 20 - Curva Típica de Cura de uma Resina Poliéster/MEKP/Cobalto a 25 °C	48
Figura 21 – Sequência de empilhamento.....	49
Figura 22 - Manta: a), Tipos de Tecido, b) Tecido Básico, c) Sarja e d) Cetim	50
Figura 23 - Molde de Skate produzido por RTM.....	51
Figura 24 - Simulações da Frente de Fluxo Variando Ponto de Injeção e de Saída	53
Figura 25 - Desenho Artístico da Vista Lateral em Corte de um Molde de RTM	53
Figura 26 - Perdas no processo RTM	55

Figura 27 - Fluxograma da metodologia de projetos adotada	58
Figura 28 – Concepção do suporte em perspectiva Isométrica.....	60
Figura 29 - Suporte do Molde Fabricado para Uso no Processamento por RTM.....	61
Figura 30 - Montagem Utilizada para o Teste de Velocidade.....	62
Figura 31 - Montagem do Teste de Vazão	64
Figura 32 - Montagem do Teste de Força	65
Figura 33 - Montagem para Medição da Pressão de Injeção	66
Figura 34 - Interface do Software Windows Movie Maker	67
Figura 35 - Metodologia de Corte: a) Fresadora universal Wecheco® FU-500, b) Corte de placa compósita e c) Disco utilizado	72
Figura 36 - Disposição dos Corpos de prova	73
Figura 37 - Montagem para o Ensaio de Tração	75
Figura 38 - Diagrama de Cargas	76
Figura 39 - Montagem para o Ensaio de Flexão	77
Figura 40 -Fluxograma das Atividades Desenvolvidas Neste Trabalho de Pesquisa....	78
Figura 41 - Composite Integration Ciject™ ZERO.....	80
Figura 42 - Composite Integration Ciject™ ZERO.....	81
Figura 43 - Magnum Venus Plastech™ Innovator Pro	83
Figura 44 - GlasCraft® Spartan III	84
Figura 45 - Pistão de Injeção da ISOJET® Equipements.....	85
Figura 46 - Radius 2100cc Pneumatic RTM Injection System.....	87
Figura 47 - Equipamentos de Injeção Radius: a) 2100cc, b) 5000 cc e c) 10000cc.....	88
Figura 48 - Desenho Esquemático da Bomba Escrava	89
Figura 49 - Gráfico da pressão de injeção x Curso	90
Figura 50 - Sistema de Bombeamento de Múltiplos Fluidos com Medição Precisa: a) Vista Frontal da Concepção, b) Vista Lateral, c) Detalhe do sistema de ajuste.	91
Figura 51 - Equipamento e Estação de Processamento por RTM	92
Figura 52 - Sistema de Instrumentação Adotado no Processamento	93
Figura 53 - Gráfico da Pressão de Injeção dos Equipamentos e Processamentos de Injeção de Resina por RTM.....	94
Figura 54 - Esboço da Concepção Escolhida para a Bomba: a) Vista Ortogonal 1. b) Vista Ortogonal 2.....	98
Figura 55 - Esboço da Concepção Escolhida para o Subsistema Estrutural	101

Figura 56 - Esboço da Concepção Escolhida para o Subsistema Acionamento: a) Vista Ortogonal 1 e b) Vista Ortogonal 2.....	104
Figura 57 - Concepção Escolhida para o Subsistema Misturador.....	106
Figura 58 - Concepção Escolhida para o Subsistema Descarga: a) Botoeira e b) Bomba	109
Figura 59 - Concepção Escolhida para o Subsistema Transporte Bomba-Molde	111
Figura 60 - Esboço da Concepção do Equipamento de Injeção.....	114
Figura 61 - Esboço da Concepção Aprovada do Equipamento de Injeção: a) Vista 1, b) Vista 2	116
Figura 62 - Análise de Tensão do Êmbolo	121
Figura 63 - Análise de Tensão da Bomba	122
Figura 64 - Análise de Tensão da Mesa.....	123
Figura 65 - Análise de Tensão do Suporte	124
Figura 66 - Rodízio Utilizado	125
Figura 67 - Transmissor de Pressão	127
Figura 68 - Fabricação: a) Torneamento da Camisa e b) Brunimento da Camisa	129
Figura 69 -Acabamento do Êmbolo.....	129
Figura 70 - Equipamento de Injeção de Resina por RTM Concebido	130
Figura 71 - Injeção com Água Destilada	131
Figura 72 - Montagem da Calibração: a) Célula de Carga Montada, b) Sistema de Aquisição.....	133
Figura 73 - Gráfico de Calibração da Célula de Carga.....	134
Figura 74 - Gráfico da força experimental do pistão pelo tempo.	135
Figura 75 - Comparação analítico/experimental da força de avanço do cilindro pneumático (kN) pela pressão (bar).	136
Figura 76 - Bancada Desenvolvida para a Calibração do Sensor de Ultrassom	138
Figura 77 - Perfil do Deslocamento do Cilindro pelo Tempo.	139
Figura 78 - Gráfico da Velocidade do Cilindro pelas Pressões na UTA.	140
Figura 79 - Perfil da Pressão de Injeção.	141
Figura 80 - Concepção do Molde para Injeção por RTM em Vista Explodida.	143
Figura 81 - Análise da Tensão para a Placa.	144
Figura 82 - Molde Fabricado em Acrílico.....	146
Figura 83 - Vedação tipo Tampa em Processo de Fabricação.....	146
Figura 84 - Molde Fabricado.	147

Figura 85 - Configuração das entradas e saídas.....	148
Figura 86 - a) Montagem, b) Demonstração da eficiência da vedação, c) Placa no espaçador e d) Vista superior da placa obtida.	149
Figura 87 - a) Molde Desativado e b) Placa com baixa quantidade de fibra.	151
Figura 88 - Primeiro Teste com o Novo Molde: a) Montagem, b) Pequena quantidade de resina injetada	152
Figura 89 - Segundo Teste com o Novo Molde: a) Montagem, b) Vista superior da placa injetada e c) Vista lateral da placa injetada.	153
Figura 90 - Efeito do Flow on Top.	154
Figura 91 - terceiro Teste com o Novo Molde: a) Montagem, b) Vista inferior da placa injetada e c) Vista lateral da placa injetada.	155
Figura 92 - Quarto Teste com o Novo Molde: a) Montagem, b) Vista superior do molde;	156
Figura 93 - Quinto Teste com o Novo Molde: a) Molde preenchido, b) Vista superior da placa injetada e c) Vista lateral da placa injetada.....	157
Figura 95 - Corpos de Prova para o Ensaio de Tração.	159
Figura 96 - Gráficos da Tensão de Tração (MPa) x Deformação (%) da Placa em Tecido (CP06)	159
Figura 96 - Fratura do Corpo de Prova Compósito: a) Durante o ensaio e b) Após o ensaio.....	161
Figura 97 - Corpos de Prova para o Ensaio de Flexão.	162
Figura 99 - Gráficos da Carga (KN) x Deformação (mm) da Placa em Tecido (CP05).....	162
Figura 99 - Fratura do Corpo de Prova Compósito: a) Durante o ensaio e b) Após o ensaio.....	164
Figura 100 - Frente de escoamento em vários instantes de tempo: b) 29,07s, c) 33,50s, d) 34,17s e 41,50s.....	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos.....	26
Tabela 2 - Diferentes tipos de Resina poliéster.....	45
Tabela 3 - Etapas do Processo de Cura de Matrizes Poliméricas.....	47
Tabela 4 - Materiais de Moldes para RTM.	52
Tabela 5 - Características da Resina Poliéster.	57
Tabela 6 - Atividades no Pré-processamento.....	68
Tabela 7 - Atividades Durante o Processamento.	70
Tabela 8 - Atividades no pós-processamento.	71
Tabela 9 - Métodos para avaliação das propriedades mecânicas de materiais compósitos.	73
Tabela 10 - Características da Concepção 01.	115
Tabela 11 - Características da Concepção 02.	117
Tabela 12 - Características do Cilindro Selecionado.....	118
Tabela 13 - Ajuste e tolerância da bomba.	119
Tabela 14 - Resultados do Teste Inicial.	132
Tabela 15 - Vazão media.	132
Tabela 16 - Dados Extraídos do Gráfico de Calibração	134
Tabela 17 - Resultados da Calibração do Sensor de Ultrassom.	138
Tabela 18 - Dados Extraídos do Gráfico d x t.....	140
Tabela 19 - Parâmetros dos Testes.	148
Tabela 20 - Propriedades Mecânicas Médias Obtidas no Ensaio de Tração.	160
Tabela 21 - Propriedades Mecânicas Médias Obtidas no Ensaio de Flexão	163
Tabela 22 - Valores das Velocidades Médias de Avanço em x e y	165

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema Bomba de Solução Fluida	96
Quadro 2 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema Estrutural	99
Quadro 3 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema Acionamento.....	102
Quadro 4 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema Misturador.....	104
Quadro 5 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema de Descarga	107
Quadro 6 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema de Transporte Bomba-Molde.	110
Quadro 7 - Matriz Morfológica do Projeto Conceitual.....	112
Quadro 8 - Matriz Morfológica do Projeto Conceitual com os Subsistemas Selecionados	113
Quadro 9 - Matriz Morfológica do Projeto Conceitual com os Subsistemas Selecionados	115
Quadro 10 - Dimensionamento, Peso e Densidade da Placa Processada	150
Quadro 11 - Dimensionamento, Peso e Densidade da Placa Processada	158

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

A	Área de seção transversal
ASTM	American Society for Testing and Materials
b	Largura
CLP	Controlador Lógico Programável
CP	Corpo-de-prova
DGEBA	Epóxi-éter-diglicidil de bisfenol
F	Carga Qualquer
$F_{\text{pistão}}$	Força aplicada pelo pistão
$F_{\text{máx}}$	Carga máxima
$F_{\text{reação}}$	Força de reação
g	Aceleração da gravidade
h_l	Perdas Distribuídas
h_{lm}	Perdas localizadas
h_{lt}	Perda de carga total
ISO	International Organization for Standardization
K	Fator de perda de carga localizado
LAMMEA	Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas
<i>Layup</i>	Sequência de empilhamento
L_e	Limite de escoamento
MPG	<i>Mold Pressure Guard</i>
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PPGEM	Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
P	Potência
P_1	Pressão de entrada
P_2	Pressão de saída
RTM	Moldagem por Transferência de Resina
RTM_{light}	Moldagem por Transferência de Resina light
SAE	Society of Automotive Engineers

SSM	Cisalhamento interlaminar
VARTM	Moldagem por Transferência de Resina assistida por vácuo
V	Valor qualquer de velocidade
V	Valor qualquer de tensão
V_{trav}	Velocidade média de travessia
V_x	Velocidade média em relação ao eixo x
V_y	Velocidade média em relação ao eixo y
V_1	Velocidade de entrada
V_2	Velocidade de saída
HP-RTM	Moldagem por Transferência de Resina a altas pressões
CRTM	Moldagem por Transferência de Resina por compressão
HP-CRTM	Moldagem por Transferência de Resina por pressões compressivas
<i>traps</i>	Saídas de ar
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
$U_{\text{méd}}$	Vazão média
$U_{\text{méd.máx}}$	Valor máximo da vazão média
x	Coordenada Cartesiana
y	Coordenada Cartesiana
z_1	Altura de entrada
z_2	Altura de saída
ρ	Densidade relativa
ζ	Fator de atrito
L	Comprimento de tubo
d	Diâmetro de tubo
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima de tração
ϵ_{rup}	Deformação de ruptura em porcentagem
ϕ	Diâmetro do êmbolo
ϵ	Erro

1. INTRODUÇÃO

Para se perceber o grau de influência dos materiais na vida da humanidade basta lembrar que algumas das eras da nossa história são nomeadas por eles. Nas últimas décadas os materiais compósitos vêm se destacando no cenário mundial e em conjunto com os plásticos e cerâmicos, são os materiais que mais crescem em volume de produção e penetração de novos mercados (BARBERO, 1999).

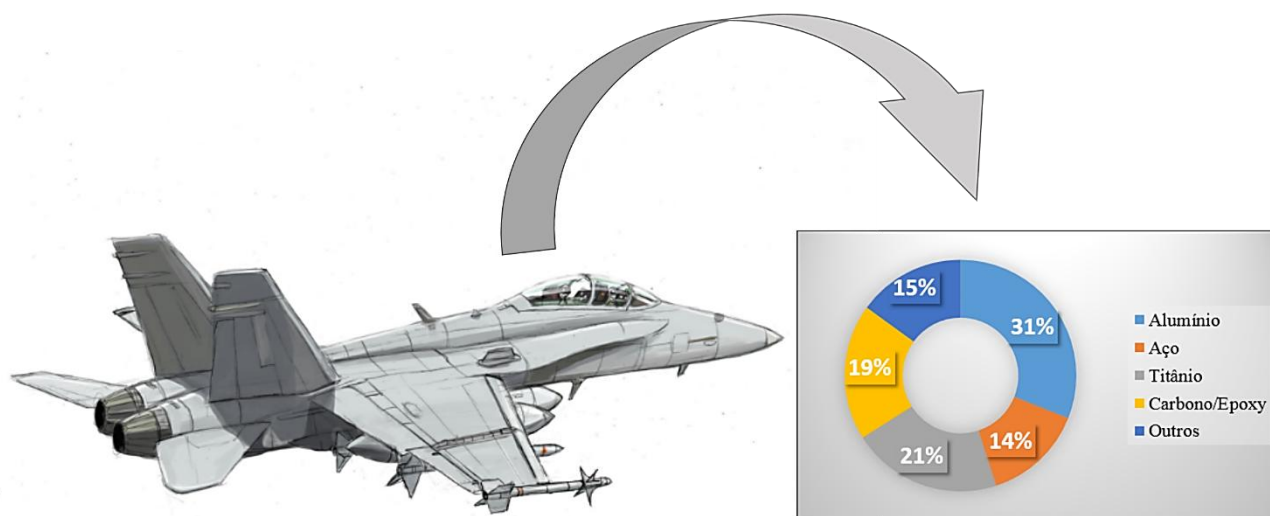
Os compósitos têm grande importância industrial devido as suas características e propriedades específicas. Dentro deste aspecto, tais materiais permitem ao engenheiro, até certo ponto, projetar um material enfatizando as características necessárias e minimizando outras indesejáveis, adequando-os para cada aplicação (MENDONÇA, 2005). Uma gama de propriedades é relevante e podem ser manipuladas, tais como: baixo peso, rigidez, resistência estática, à abrasão e a ambientes corrosivos, isolamento ou condutividade elétrica, térmica e acústica (SOEIRA, 2009).

Citamos como exemplo do crescente crescimento desse material a indústria aeronáutica, então Baker et al., (2004) exemplifica este crescimento com o F-18C/D e o seu sucessor F-18E/F, onde há um aumento no uso de compósitos carbono/epoxy de 9% de uma geração para outra. Na Figura 1 observa-se a porcentagem de cada material no peso da estrutura do F-18E/F.

Nesse aspecto, o processo de moldagem por transferência de resina (RTM) vem se destacando substancialmente devido à qualidade de acabamento do produto final, bem como sua alta capacidade de produção e baixo impacto ambiental.

Por RTM, o reforço fibroso é geralmente seco e por muitas vezes montados fora do molde, como uma pré-forma, com as características geométricas do produto final (MORREN et al, 2008). Após, a pré-forma é colocada no molde e então o mesmo é fechado. Há então, a injeção de uma solução de resina e catalisador que ao impregnarem a fibra e o molde por completo iniciam o processo de cura, culminando na obtenção, pós-cura, do compósito acabado (FERLAND et al, 1996).

Figura 1 - Porcentagem no Peso da Estrutura.



Fonte: Autoria Própria.

Assim, o objetivo deste trabalho de pesquisa foi projetar um equipamento de injeção de resina por RTM, de cunho laboratorial e de baixo custo, por meio de uma metodologia de projeto, capaz de processar com eficácia placas compósitas com matriz de poliéster e reforço em fibra de vidro.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um equipamento de injeção de resina para processar compósitos via moldagem por transferência de resina de uso laboratorial.

2.2. Objetivos Específicos

- Estudar os equipamentos de injeção de resina via RTM existentes no mercado;
- Compreender o princípio de funcionamento dos componentes e sistemas do equipamento;
- Utilizar a metodologia de projeto para o desenvolvimento de um equipamento de injeção de resina via RTM;
- Produzir um componente estrutural de material compósito com o equipamento, avaliando suas propriedades mecânicas quanto a tração e flexão.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

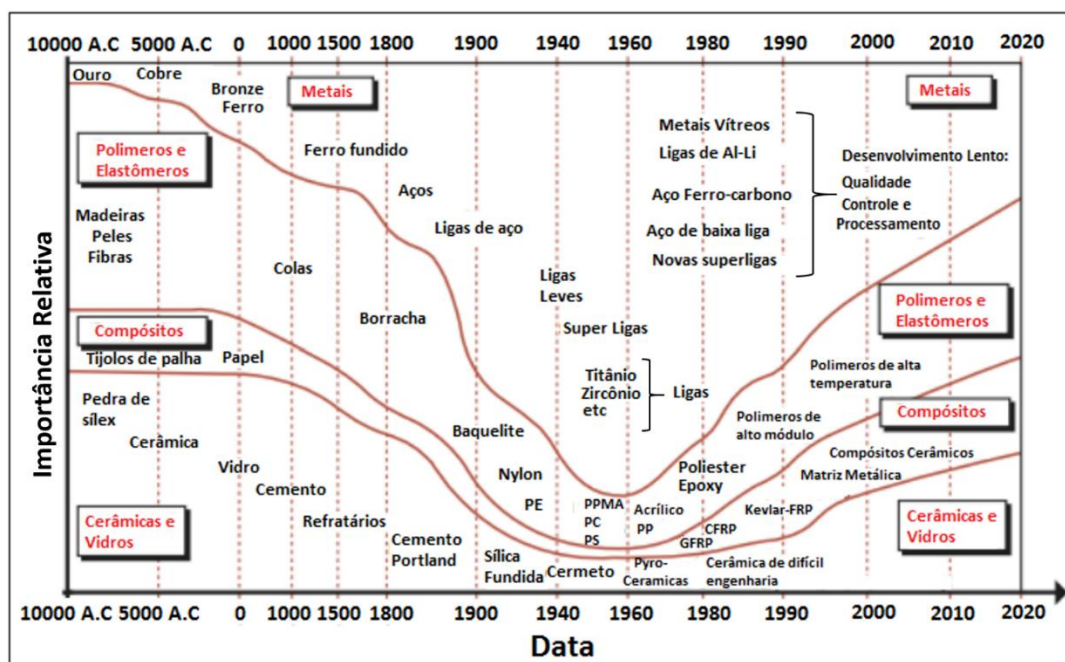
3.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

Cotidianamente, relata-se que um compósito é um material formado por uma mistura de dois ou mais componentes com fases distintas. Entretanto, a sua definição transpassa essa conceituação. Segundo Callister (2008, p. 423) um compósito é: “Um material multifásico que é feito artificialmente, em contraste com um material que ocorre ou que se forma naturalmente. Além disso, as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e estar separadas por uma interface distinta”. É relevante mencionar ainda, que os seus componentes devem estar presentes em proporções razoáveis, com mais de 5% de cada componente na composição final. As fases constituintes devem apresentar propriedades diferentes, gerando assim, um produto final com propriedades sensivelmente distintas destas. O material final é obtido por diversos processos (MATTHEWS; RAWLINGS, 2006).

Em geral, os compósitos se apresentam em duas fases: a fase contínua e a fase dispersa, também chamadas de matriz e reforço, assim a função principal da matriz é envolver o reforço. No caso de compósitos reforçados com fibras, a matriz tem a função de ligar as fibras umas às outras e promover a transmissão e distribuição das tensões, quando o material está sujeito a cargas aplicadas (POTTER, 1997). O reforço é responsável diretamente pelas propriedades mecânicas do material, tais como: resistência a tração, dureza, tenacidade e rigidez.

Apresenta-se, na Figura 2, por meio de um gráfico proposto por Ashby (2005) a evolução dos materiais de engenharia por sua importância relativa ao longo do tempo.

Figura 2 - Gráfico da evolução dos materiais de engenharia ao longo do tempo.



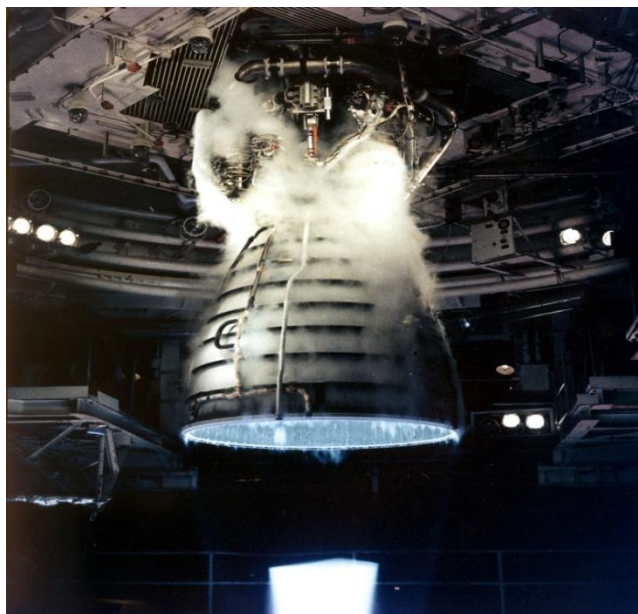
Fonte: Adaptado de ASHBY, (2005).

No que tange a utilização dos materiais compósitos, pode-se observar que seu início vem de muito tempo: Cerca de 10000 a.C. com o uso de tijolos de palha até quase o ano zero. A partir dos primeiros anos da década de 1960, com o desenvolvimento de materiais com uma qualidade e resistência igual à dos metais e com uma taxa mais lenta de desenvolvimento de novas ligas metálicas, as indústrias de plásticos e compósitos cresceram vertiginosamente, bem como a perspectiva para sua utilização, evolução e consequente o crescimento até 2020, como foi apresentado na figura anterior.

De acordo com Marinucci (2011, p. 21) “A evolução dos compósitos poliméricos tem permitido a fabricação de peças e estruturas antes reservadas aos metais”. Tem-se usado cada vez mais compósitos como componentes estruturais, dado o fato de que este tipo de material combina propriedades mecânicas desejadas à especificidade da aplicação, gerando, na maioria dos casos, diminuição das dimensões do componente, bem como da massa dele. Tais características lhes renderam aplicações em diversas

áreas, como: aeroespacial, aviação comercial, automóveis, entre outros. Na Figura 3 pode-se observar o teste de partida do motor principal de um ônibus espacial onde a tubeira (em destaque) é feita de compósito do tipo carbono-carbono.

Figura 3 - Tubeira de compósito carbono-carbono.



Fonte: www.nasa.org, (1981).

Os materiais compósitos têm uma série de características singulares, que lhes propiciam as mais diversas aplicações, principalmente estruturais. Entretanto, certas características são negativas como a baixa resistência ao impacto. A susceptibilidade de compósitos laminados ao dano por impacto, devido à baixa capacidade de se deformar plasticamente e a baixa força interlaminar têm dificultado a generalização da sua aplicação, particularmente em estruturas sujeitas aos danos por impacto quando em serviço (REID; ZHO, 2000).

A Tabela 1 mostra algumas vantagens e desvantagens encontradas nos materiais compósitos.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos materiais compósitos.

VANTAGENS	DESvantagens
1. Elevada rigidez específica	1. Grande dispersão nas propriedades
2. Elevada resistência específica	2. Sensibilidade aos processos de produção
3. Elevada resistência à fadiga	3. Análise complexa necessária
4. Boa resistência à corrosão	4. Fratura e sensibilidade ao dano
5. Estabilidade térmica e baixa condutibilidade	5. Reparação complexa
6. Condutibilidade elétrica variável com o projeto	6. Descarte pode ser difícil
7. Amortecimento de vibrações	7. Custo de matéria prima e fabricação

Fonte: Adaptado de Composite Materials Handbook, (2002).

Conforme MARINUCCI (2011):

É importante salientar que as propriedades dos compósitos estão diretamente associadas às propriedades dos elementos constituintes do material, tais como propriedades da fibra e da matriz, concentração ou frações volumétricas, interface e adesão fibra/matriz, disposição das camadas e orientação, bem como pela geometria do filamento, tal como forma e tamanho.

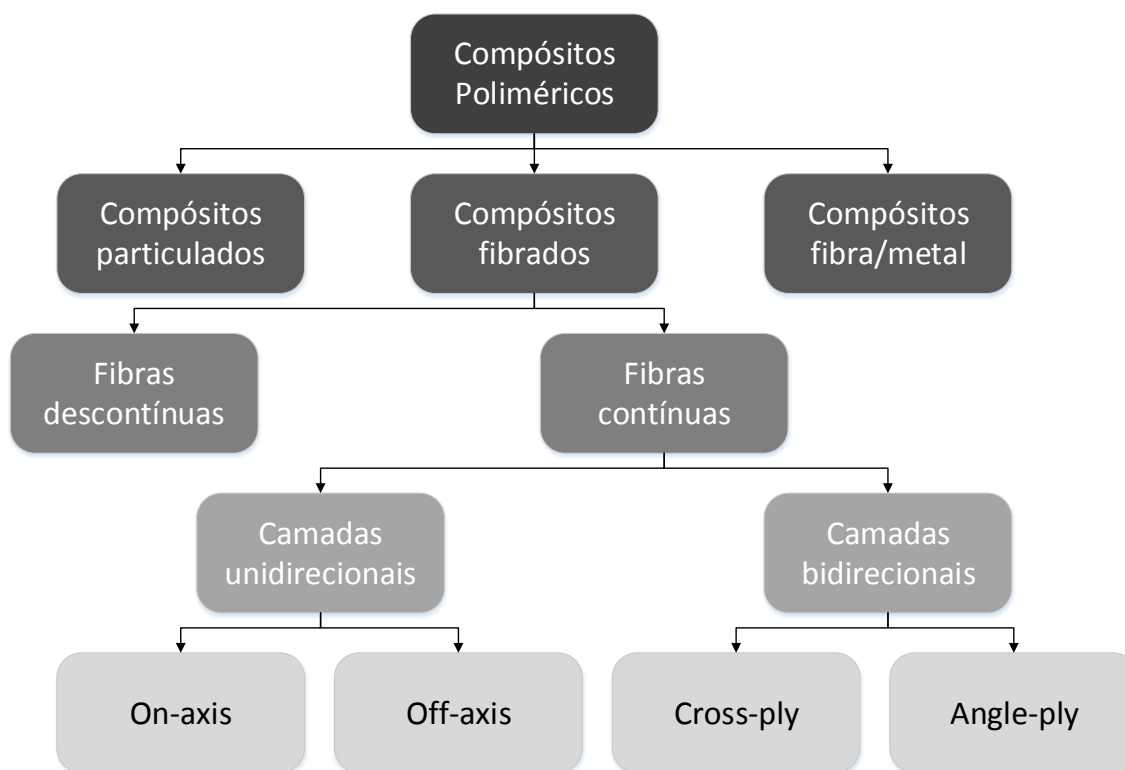
Por essas características os compósitos foram classificados de acordo com o tipo de matriz, fibra, sua direção entre outras.

3.1.1. Classificação dos Materiais Compósitos

Nos materiais compósitos a direção e a geometria do reforço influenciam de forma substancial a resistência do produto final (Jones, 1975), por conseguinte se faz imprescindível uma classificação no que se refere a esses aspectos. Segundo Marinucci (2011), os compósitos podem ser constituídos de elementos de reforço particulados,

fibrados ou fibra/metal. Os compósitos particulados podem ser classificados como: esféricos, cúbicos, tetragonais ou de qualquer outra forma regular ou irregular, mas quase sempre equiaxiais. Os fibrados têm a fibra como elemento de reforço estrutural, cuja apresenta como particularidade o fato de possuir um comprimento muito maior do que as dimensões de seção transversal. A necessidade de se conseguir a isotropia conduziu ao desenvolvimento de laminados fibra/metal, que, intimamente ligados, associam características dos materiais metálicos e compósitos (GATTI, 2009). Pode-se observar uma divisão pormenorizada – deste contexto – na Figura 4.

Figura 4 – Classificação dos materiais compósitos.



Fonte: Adaptado de Marinucci, (2011).

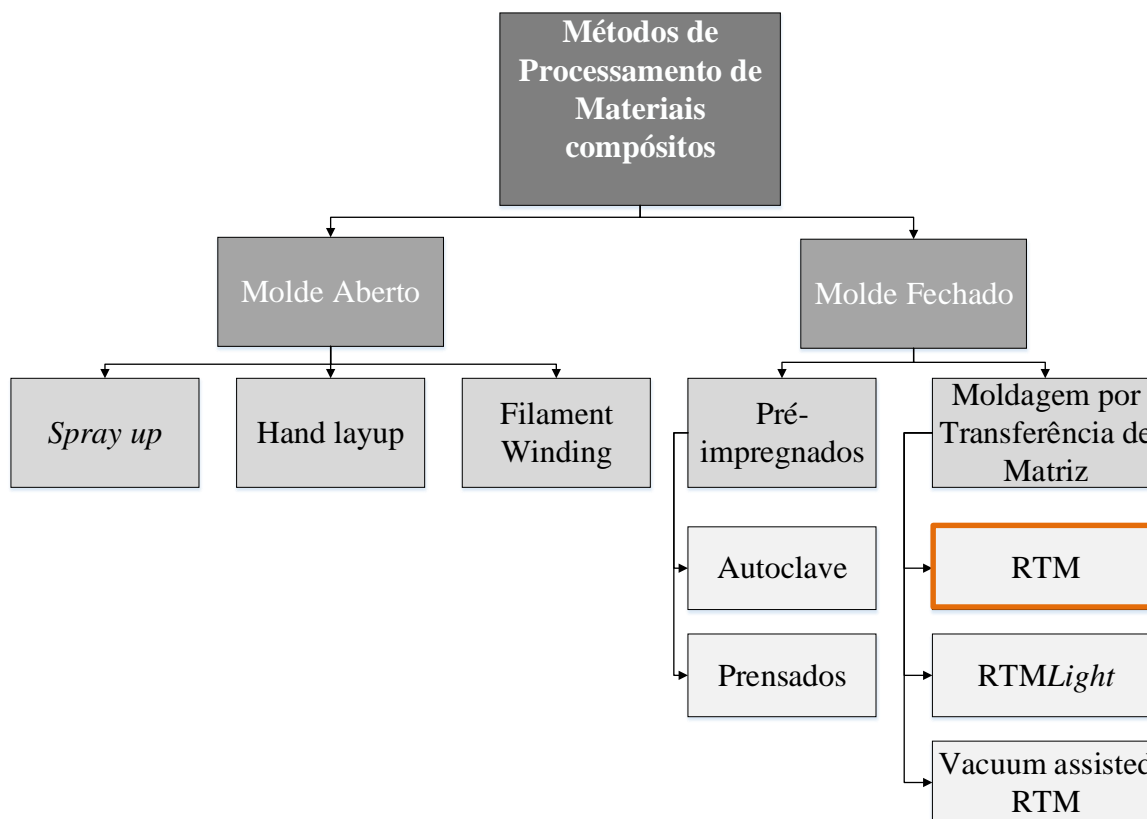
Dentre as matrizes mais empregadas estão às poliméricas, cerâmicas e metálicas. As fibras mais empregadas para reforço em compósitos são as fibras de vidro, de boro, de sisal, de quartzo, de carbono entre outras (BAERE, 2001).

3.2. PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Conforme Marinucci (2011) existe uma divisão conceitual nos processos de fabricação de peças e componentes de materiais compósitos: processo de molde aberto e de molde fechado. O referido autor comenta ainda, que a diferença principal está na qualidade do acabamento dos produtos finais. Nos processos de molde aberto, somente, uma das faces utiliza molde, sendo esta de um acabamento superficial liso, superior a face aberta. Nos processos de molde fechado tem-se esse acabamento liso em ambas as faces do produto final, dado a utilização de um molde de encaixe.

Observa-se na Figura 5 uma classificação dos métodos de processamento de materiais compósitos.

Figura 5 – Métodos de Processamento de Materiais compósitos.



Fonte: Autoria Própria.

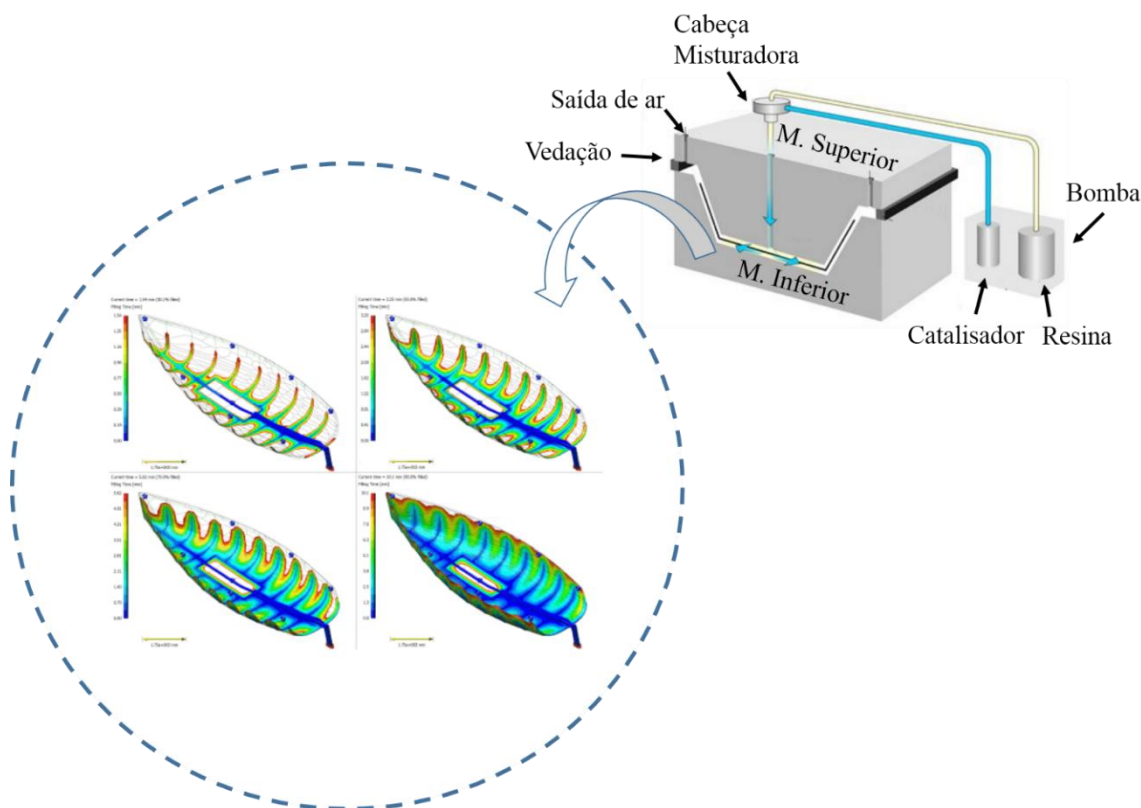
Amorim (2007), menciona que, a antes conhecida geração dos projetos para mínimo peso (*design for minimal Weight*), mudou seu foco com o despertar dos diversos setores industriais nos anos 80 e 90, passando para geração de projetos para mínimo custo (*design for cost*), que são processos mais tradicionais, como a laminação manual (*hand lay-up*), laminação por projeção (*spray-up*) e o enrolamento filamentar (*filament winding*). Estes podem ser considerados processos com baixa produtividade ou específicos para geometrias relativamente simples em detrimento do processamento em autoclave, que utiliza pré-impregnados (conhecidos como pré-pregs). Este é adotado para a produção de compósitos de alta performance. Há necessidade de um gás inerte durante seu processo aliado a um armazenamento dos pré-pregs sob refrigeração. A complexidade inerente do processo leva a um aumento do custo. Logo, a possibilidade de produzir peças compósitas através de uma técnica que adequasse boa qualidade a um baixo custo, fez com que o método RTM, obtivesse grande interesse e seu desenvolvimento ocorresse nas mais variadas frentes de produção, sofrendo variações e gerando uma nova gama de métodos, aos quais o RTM *Light* e *Vacuum assisted* RTM (VARTM), servem como exemplo.

3.2.1. Processamento via Moldagem por Transferência de Resina - RTM

O processamento por RTM foi inicialmente desenvolvido para aplicações gerais aeroespaciais na década de 1980 e seu desenvolvimento foi apoiado por um esforço de pesquisa substancial visando explicar aspectos fundamentais do mesmo por meio de modelos efetivos (Potter, 1999).

A Figura 6 ilustra o processo:

Figura 6 – Esquema representativo do processo RTM.



Fonte: Autoria Própria.

A pré-forma (reforços no formato da peça) é primeiramente preparada e posicionada no molde, que é então fechado e as fibras comprimidas, deixando-as com a fração volumétrica desejada. Uma proporção de resina e catalisador são misturadas. Posteriormente, inicia-se a injeção de uma solução de resina e catalisador no molde, onde temos a impregnação das fibras até o enchimento completo do mesmo. Então, acontece a cura e em seguida a retirada do produto final.

Conforme (Amico e Lekakou, 2001) a moldagem por transferência de resina vem sendo estudada extensivamente nos últimos dez anos e as suas vantagens são bem estabelecidas, sendo considerada um processo versátil, capaz de produzir compósitos com diferentes formas e grande performance estrutural. Com base em (SHEARD; MANTELL, 1998) o RTM permite uma grande variedade de materiais de pré-formas e

essa flexibilidade permite o projeto de peças, que variam de pequenas à grandes dimensões, com performance estrutural adaptadas para uma aplicação particular.

A Figura 7 exemplifica uma aplicação do processo descrito no nariz de um jato comercial. Demonstra uma aplicação muito utilizada nos jatos comerciais na tentativa de garantir propriedades semelhantes às do aço, bem como o acabamento necessário às aplicações aeronáuticas no que tange à aerodinâmica.

Figura 7 – Aplicação do processo RTM.



Fonte: aviationnews, (2014).

Amorim (2007) comenta que fatores como o processo permitem arquiteturas diversas com moldes de peças de grande tamanho, utilizando as mais variadas resinas e com alta fração volumétrica de fibra, possibilitando diversos tipos de acabamentos superficiais, apresentando boa tolerância dimensional com baixo custo dos equipamentos para produção (molde e sistema de injeção), que comprovam que o processamento por RTM é uma das mais promissoras técnicas de fabricação de materiais compósitos e já vem sendo amplamente utilizado (GOSS, 2010). Ampliando

ainda as vantagens apresentadas pelo processo, a viabilidade de o projetista desenvolver materiais para aplicações específicas, ou seja, projetar o material compósito com propriedades previamente estabelecidas para satisfazer condições locais e específicas de carregamento.

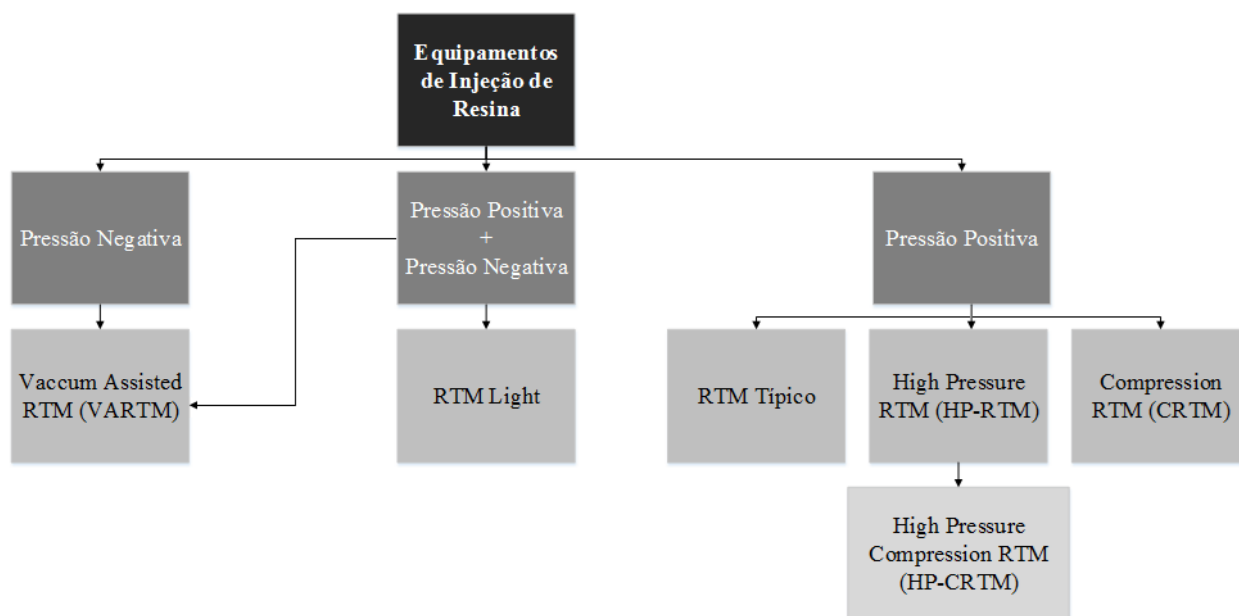
3.3. INJETORES DE RESINA VIA RTM COM BASE EM SUAS VARIAÇÕES DE PARÂMETROS DE PROCESSO

Os equipamentos injetores de resina, pelo processo de RTM, são maquinários que realizam adequadamente, em forma de trabalho, o deslocamento da mistura fluida (resina + catalisador) para o molde. Seu princípio de funcionamento, na sua concepção mais simples, trata-se da deposição da mistura fluida em uma bomba de deslocamento positivo, que por sua vez é acionada por um sistema gerador de força, este proporciona um deslocamento no fluido com uma pressão e velocidade, criando um escoamento. O fluido, então, passa da bomba para as mangueiras e válvulas até chegar ao final do trajeto: O molde.

Dependendo da variação do processo RTM utilizado, pode haver a necessidade da instalação de outros componentes de auxílio, tais como: bomba de vácuo, prensa hidráulica e até mesmo modificar o princípio de acionamento: hidráulico, elétrico ou pneumático (Amorim, 2007; Silva, 2010; Parnas *et al*, 2007; Halme, 2002).

Desta forma, é interessante uma divisão nos tipos de equipamento de acordo com o sentido da pressão utilizada e seus referidos processos (Figura 8).

Figura 8 – Equipamentos de injeção de resina via RTM.



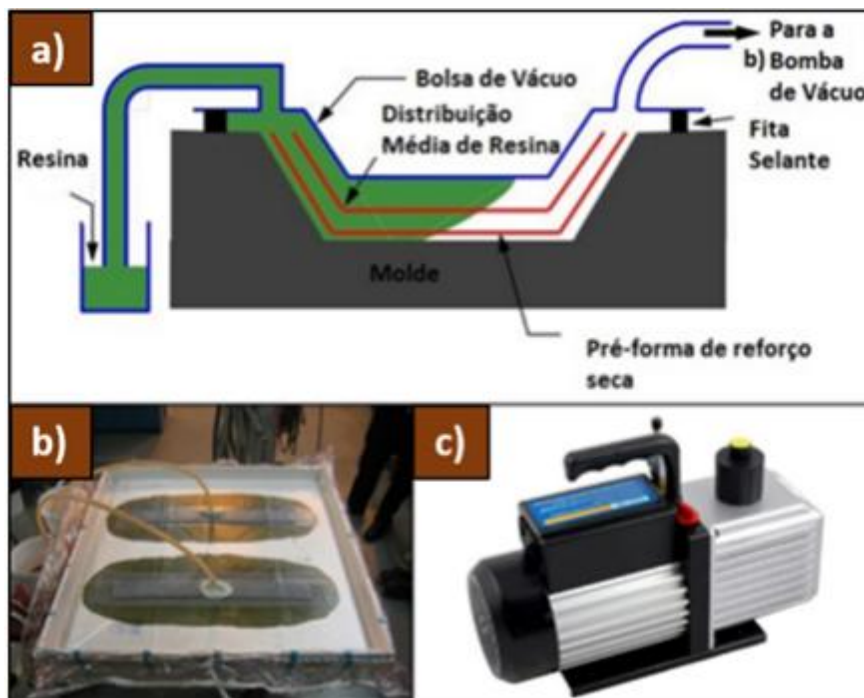
Fonte: Autoria própria, (2014).

3.3.1. Pressão Negativa / Pressão Negativa + Pressão Positiva

A pressão vacuométrica (abaixo da pressão atmosférica) é utilizada em alguns tipos de processos de infusão de resina. O processo conhecido por VARTM utiliza uma bolsa de vácuo na superfície superior, substituindo o molde rígido. Outra característica desse processo é que o mesmo pode ser realizado somente com vácuo ou com a utilização combinada de vácuo e pressão positiva.

A figura 9 ilustra o processo e o equipamento utilizado para esta variação do RTM.

Figura 9 - Equipamento utilizado no processo VARTM: a) Reservatório de resina e molde; b) molde em processo de preenchimento; c) Bomba de vácuo.



Fonte: Autoria própria, (2014).

Os reservatórios de resina (a) são dispostos a montante do molde, estes encontram-se abertos para o ambiente, condicionando a resina a uma pressão ambiente. A bomba de vácuo (c), ligada as saídas de ar, gera uma pressão vacuométrica, implicando em um gradiente de pressão e por conseguinte, um escoamento da resina para o interior do molde em direção as saídas. Existe uma necessidade de colocar-se *traps*, do inglês armadilha, nas saídas de ar.

Pode-se observar na figura 10 um *trap* característico.

Figura 10 - Trap na saída de ar de um molde.



Fonte: www.elfrenrimat.com, (2013).

Com o acessório simples demonstrado, que intuitivamente nada mais é do que um recipiente com uma seção transversal muito maior do que o diâmetro da mangueira, evita-se a entrada de resina no interior da bomba. Um possível escoamento de resina no interior da bomba poderia acarretar em sua inutilização.

3.3.2. Pressão Positiva

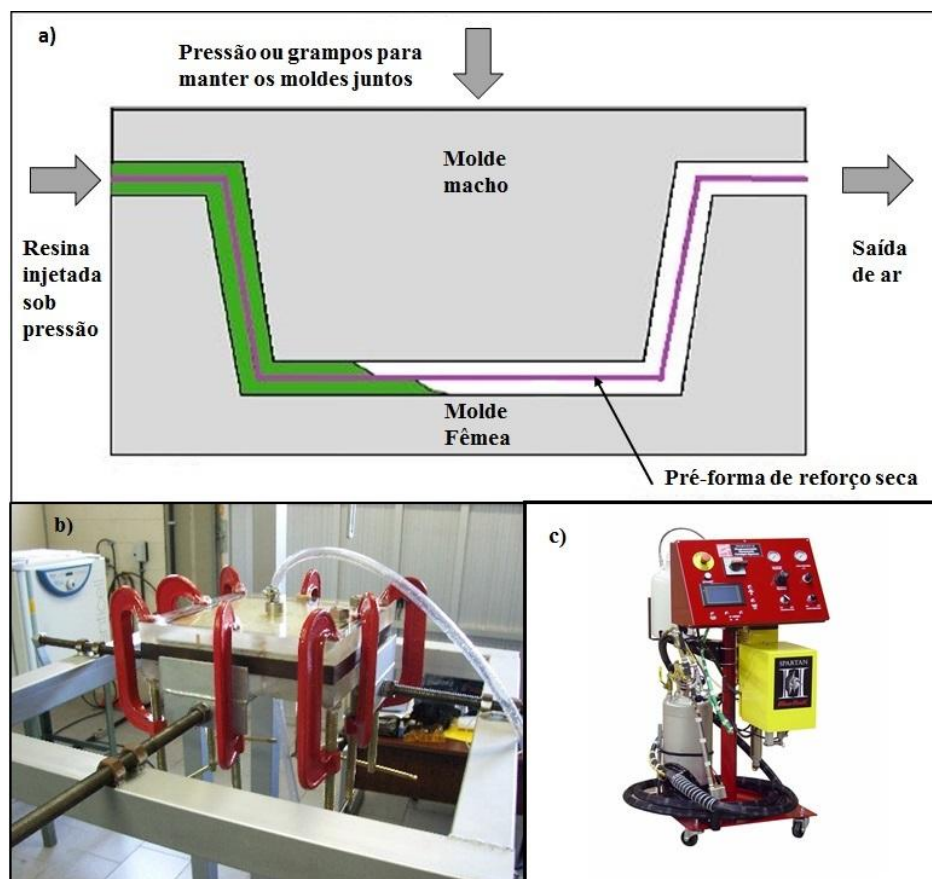
Os equipamentos que utilizam pressão positiva (Pressão de operação > Pressão atmosférica) para gerar o escoamento e conduzir a resina até o molde, possuem distinções, no que tange a porte, capacidade de injeção, pressão de injeção, tipo de acionamento, parâmetros estes, definidos pelo tipo de processo. Esses equipamentos são descritos e suas diferenças demonstradas a seguir.

3.3.2.1. RTM Típico

No processamento de componentes compósitos RTM mais convencional, é utilizada uma pressão positiva de injeção para que a resina preencha o molde e sua saída é aberta para o ambiente.

A figura 11 ilustra o processo e um modelo de equipamento utilizado para injeção.

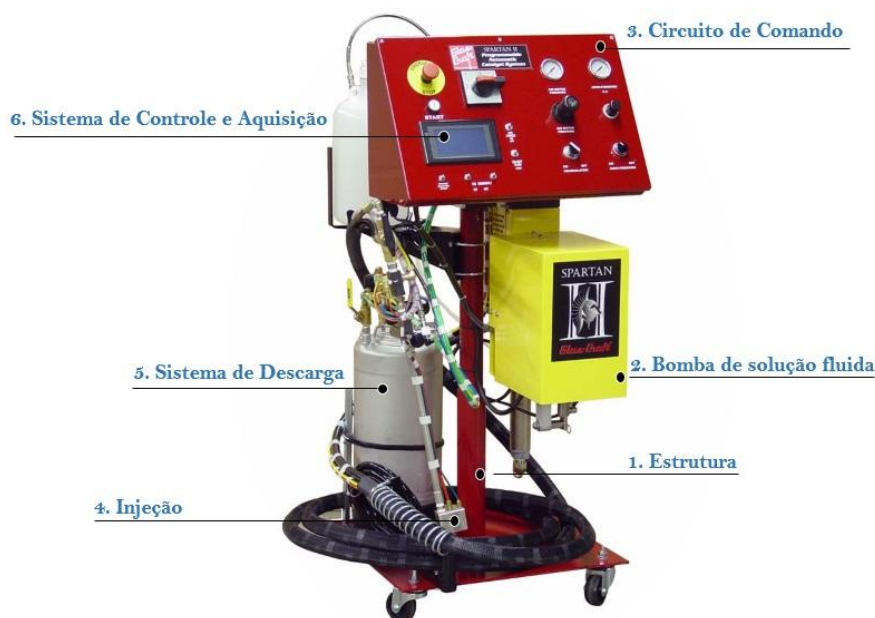
Figura 11 - Equipamento utilizado no processo RTM Típico: a) Processo RTM típico; b) Molde e conexões; c) Equipamento de injeção de resina.



Fonte: Autoria própria, (2014).

O equipamento injetor para tal processo, em geral, possui os sistemas apresentados na figura 12, podendo destoar para mais ou para menos, dependendo do grau de tecnologia empregado.

Figura 12 - Equipamento utilizado no processo RTM Típico e seus sistemas.



Fonte: Catálogo Fiberglass, (2010).

1. Estrutura: é responsável pela correta alocação dos componentes do equipamento, bem como suportar devidamente o carregamento imposto pelo seu peso ou por uma possível carga dinâmica;
2. Bomba de solução fluida: em modelos mais simplificados é utilizada uma bomba de deslocamento positivo para gerar o trabalho necessário para movimentação do mistura (resina+catalisador) ou em outros casos, há a utilização de uma bomba de duplo acionamento positivo;
3. Circuito de comando: Trata-se do circuito lógico de componentes que transformam a energia – quer seja ela hidráulica, pneumática, elétrica ou uma combinação entre elas – em energia mecânica;

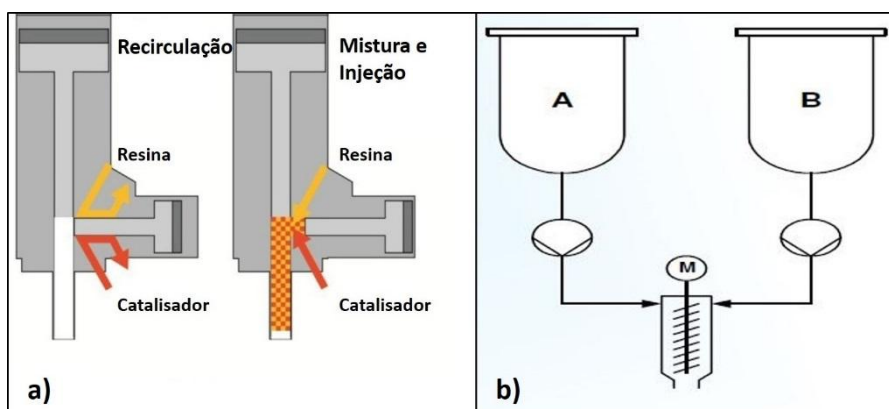
4. Injeção: Trata-se do conjunto de componentes que interligam a bomba ao molde. São compostos geralmente por condutos, válvulas e sensores que atuam de forma a controlar parâmetros de processo, tais como: pressão de injeção e vazão volumétrica;
5. Sistema de descarga: Tem por função a limpeza dos sistemas bomba e injeção por meio da imposição desses sistemas a diversos ciclos de solvente, para que nenhum resíduo de resina em cura permaneça em qualquer componente, evitando que os mesmos sejam danificados e/ou tenham a necessidade de serem repostos. Evita-se também com estes ciclos uma demora demasiada no que tange a manutenção dos componentes para uma nova injeção;
6. Sistema de controle e aquisição: seu objetivo é aquisitar dados do processo por meio de sensores, enviar esses dados para uma unidade controladora que por sua vez atua no sistema para que o mesmo trabalhe dentro dos parâmetros de processo especificados previamente, antes do início do ciclo de injeção.

3.3.2.2. *High Pressure RTM (HP-RTM)*

A grande diferença entre os equipamentos de HP-RTM e os de RTM convencional está na forma de se obter a mistura fluida (catalisador + resina) e no range de pressão alcançado em cada processo. Então, a figura 13 apresenta a diferença entre as duas formas de obter a mistura: HP-RTM (Fig.13a) e RTM convencional (Fig.13b). As pressões no processo de RTM convencional costumam chegar a valores de até 50 bar, enquanto para o processo HP-RTM, a pressão de mistura é geralmente maior que 160bar, propiciando pressões de injeção até 100bar, estas, dependendo da força de união do molde.

A Figura 13 expõe o processo, em linhas gerais, idêntico ao RTM convencional, mas com parâmetros de processos diferentes, bem como o seu equipamento que tem acionamento hidráulico e seu molde que se torna mais robusto.

Figura 13 - Processos de Mistura de Catalisador e Resina.

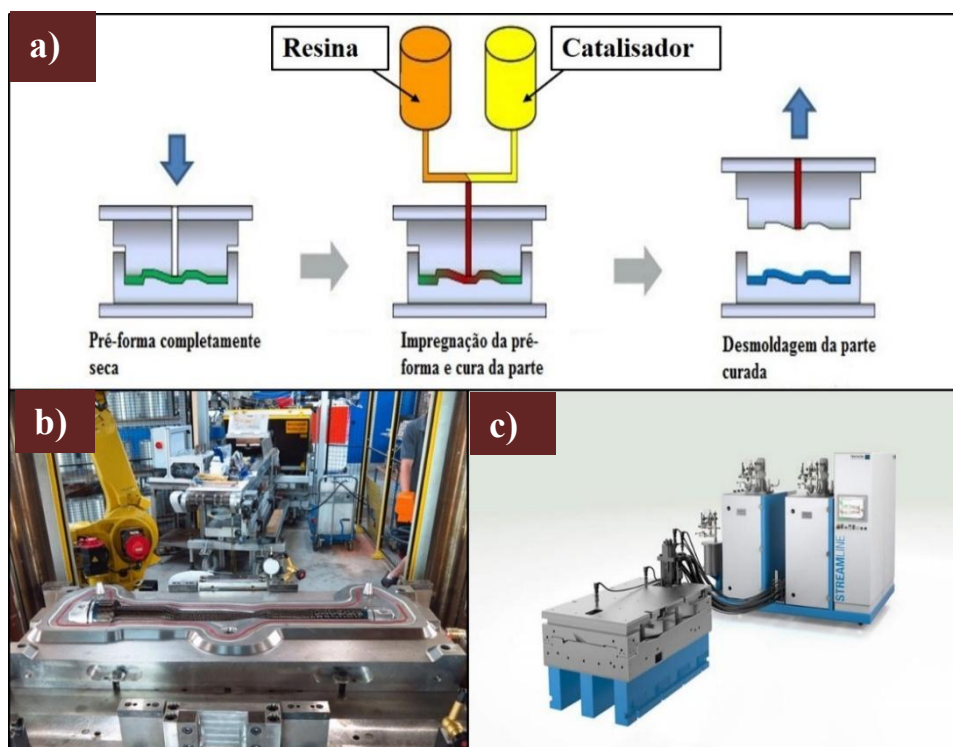


Fonte: www.reinforcedplastics.com, 2014.

No processo HP-RTM a mistura é realizada por um contra-fluxo de alta velocidade dos componentes da mistura induzidos por injetores apropriados para uma câmara de mistura cilíndrica em alta pressão. Os fluidos então se misturam, convertendo sua energia cinética em turbulência. Após alguns comandos a câmara de mistura é aberta e a solução é enviada em um fluxo laminar, através de um bico injetor ao molde. Uma das grandes vantagens, é que nesse processo não há necessidade de ciclos de solvente para realizar a limpeza da câmara de mistura, uma vez que depois da injeção dá-se o fechamento rápido desta, iniciando a recirculação.

Tal ação livra a câmara de mistura de qualquer líquido residual, representado na Figura 14a. Diferentemente, no processo convencional, como já foi descrito anteriormente, a mistura passa por uma mistura mecânica em “M” (Figura 13b) que precisa de um processo de limpeza, realizado por ciclos de injeção de solvente.

Figura 14 - Processo e Equipamentos do HP-RTM: a) Processo; b) Molde e conexões; c) Equipamento de injeção de resina.



Fonte: Autoria Própria.

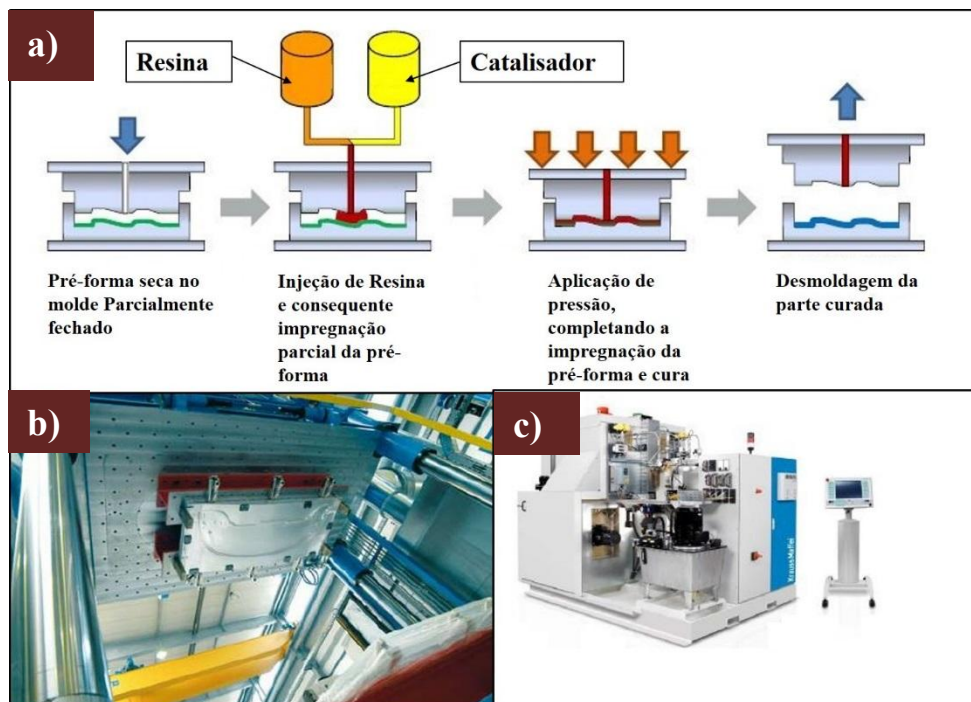
3.3.2.3. High Pressure CRTM (HP-CRTM)

O processamento de compressivo em alta pressão requer tanto do equipamento de injeção quanto do molde, para que o processo seja bem consolidado. Os equipamentos de injeção para este são dotados de unidade hidráulica, que gera a pressão de injeção, bem como, no estudo de Chaudhari et al. (2011), de uma prensa hidráulica que exerce uma força compressiva na parte superior do molde, para que a

impregnação da pré-forma se dê também na direção z e não somente nas direções x e y.

Está demonstrado na figura 15, igualmente o processo é descrito em etapas, bem como é mostrado o molde utilizado e o equipamento injetor.

Figura 15 - Equipamento utilizado no processo HP-CRTM: a) Processo; b) Molde e conexões; c) Equipamento de injeção de resina.



Fonte: Autoria Própria.

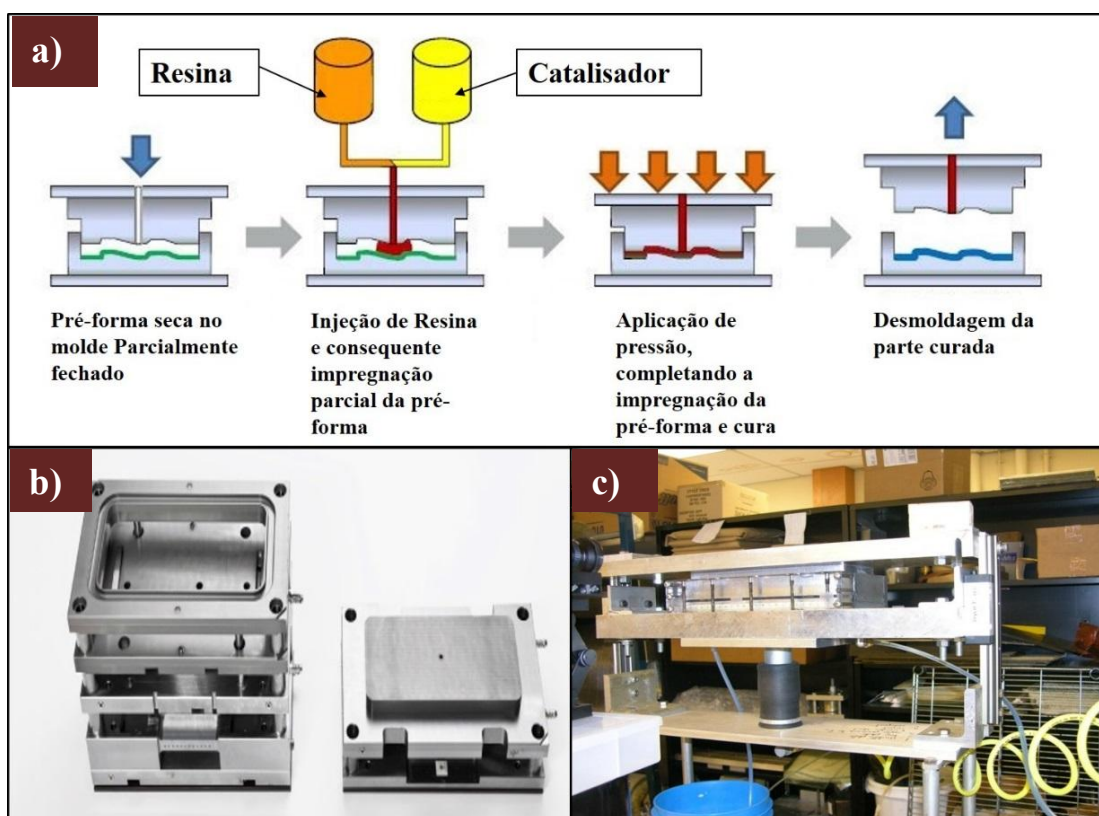
Com base em Chaudhari et al. (2011), este processo, dada a capacidade do equipamento, traz alguns benefícios e alguns desafios, tais como: redução do tempo de injeção da resina, diminuição significativa do tempo de impregnação da pré-forma, possibilidade de utilizar resinas com tempo de cura menor, entre outros.

3.3.2.4. CRTM

Segundo Merotte (2010), o processo é dividido em três fases: na primeira um espaço proposital do molde é preenchido com a quantidade de resina necessária para a

obter-se a peça final. Na segunda, a parte superior do molde é submetida a um carregamento, gerando uma pressão na resina que a faz escoar pela pré-forma. Na terceira fase o carregamento continua até atingir-se a espessura final da peça e é esperada a cura. Posteriormente a peça é retirada. Para injeção é utilizado um equipamento de RTM convencional. Para gerar o carregamento no molde é utilizado uma prensa hidráulica. Pode-se ver uma descrição do processo, bem como os equipamentos utilizados no mesmo na figura 16.

Figura 16 - Equipamento utilizado no processo CRTM: a) Processo; b) Molde e conexões; c) Equipamento de injeção de resina.



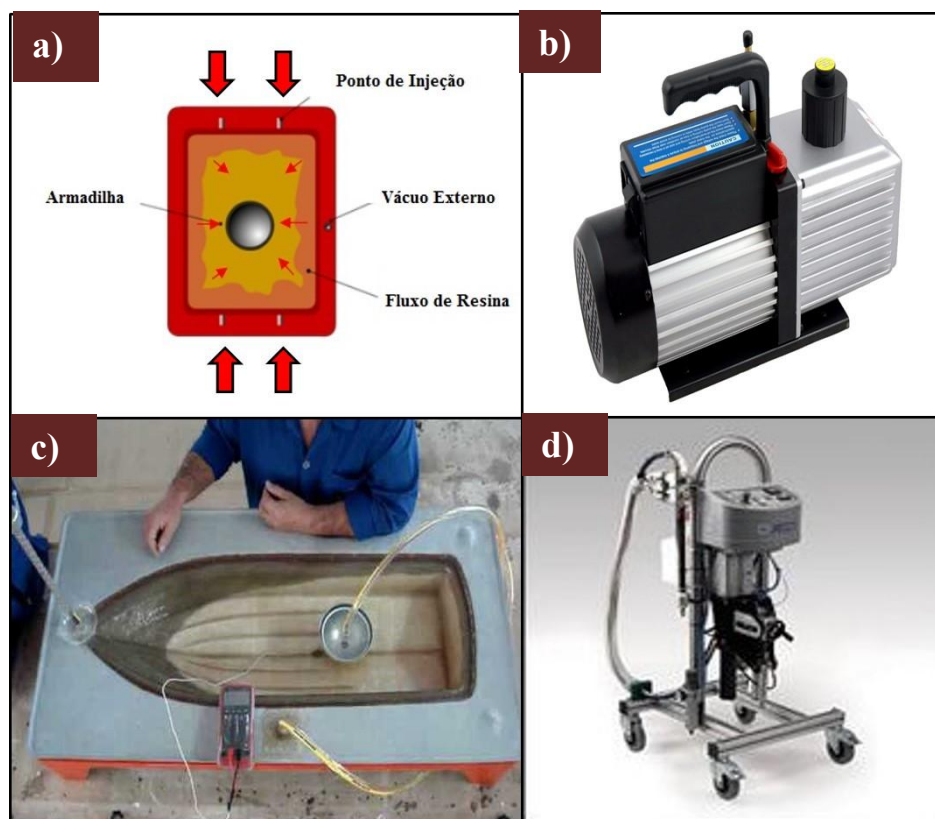
Fonte: Autoria Própria.

3.3.3. Pressão Negativa + Pressão Positiva

3.3.3.1. *RTM-light*

Garay (2010) comenta que o processo citado utiliza baixas pressões de injeção: 0,6 bar de pressão de vácuo e 0,7 de pressão de injeção. Por conseguinte, os moldes são baratos e de fácil fabricação. Se distingue do processo convencional de RTM por utilizar pressões positivas e negativas, ou seja, um equipamento de injeção convencional e uma bomba de vácuo para retirada do ar do interior do molde e para vedação do mesmo. Pode-se observar o processo, bem como os equipamentos utilizados na figura 17.

Figura 17 - Equipamentos utilizados no processo CRTM: a) Processo; b) Bomba de vácuo; c) Molde e conexões; d) Equipamento de injeção de resina.



Fonte: Autoria Própria.

Ainda, conforme Garay (2010) a primeira ação é aplicar o vácuo de vedação e conferir sua eficácia, em seguida o vácuo é acionado para a cavidade onde está a pré-forma e só então a pressão positiva é ativada, iniciando assim a impregnação da fibra. Completado o preenchimento, é iniciada a cura e depois desta é feita a abertura do molde e retirada da peça.

3.4. RESINAS POLIMÉRICAS TERMOFIXAS

Os polímeros termofixos, na sua grande maioria são líquidos a uma temperatura abaixo de 50° C, o que facilita a sua capacidade de processamento na temperatura ambiente. Têm a vantagem de necessitarem de um menor investimento em equipamentos para sua produção e sua cura pode ser obtida com a adição de agentes catalisadores ou pela adição de temperatura (MARINUCCI, 2011).

Ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas propiciam a formação de estruturas tridimensionais, tornando o mesmo insolúvel e infusível e, por conseguinte, não reciclável.

Com base em Marinucci (2011), os polímeros termofixos apresentam propriedades mecânicas e elásticas superiores aos termoplásticos e uma ótima estabilidade dimensional. Comparado aos materiais metálicos, sua desvantagem é a faixa de temperatura de utilização: na sua maioria até 150°C.

3.4.1. Resinas mais Utilizadas para Fabricação de Compósitos

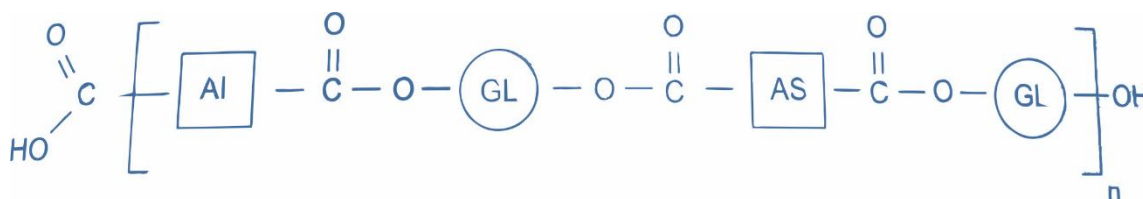
3.4.1.1. Resinas Poliéster Insaturada

Conforme Garay (2010) as resinas da classe da poliéster insaturada são produzidas via reação de condensação de ácidos orgânicos (anidrido maleico ou ftálico) com etileno e propileno glicol, em uma reação de esterificação. À base polimérica é adicionado um monômero reativo, geralmente o estireno. O biácido saturado adicionado

no reator influencia as propriedades finais da mesma, fornecendo como produto resinas poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas.

Na Figura 18 ilustra-se uma macromolécula de poliéster.

Figura 18 - Macromolécula de poliéster.



Fonte: Adaptado de Marinucci, (2011).

A figura ilustra moléculas de glicol, ácido insaturado, ácido saturado alternadas e unidas por grupos ésteres.

Na Tabela 2 tem-se as principais características das diversas resinas poliésteres.

Tabela 2 - Diferentes tipos de Resina poliéster.

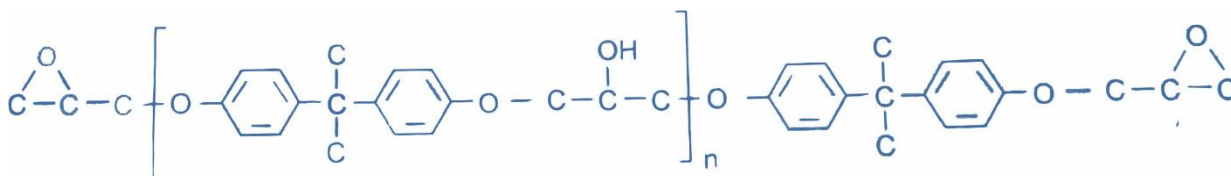
TIPOS	OBSERVAÇÕES
Ortoftálica	Resina mais comum, de menor custo, para usos básicos (não nobres).
Tereftálica	Possui resistência física um pouco superior à ortoftálica, porém baixa resistência à UV.
Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores.
Bisfenólica	Possui melhores características químicas e térmicas.

Fonte: Brouwer WD; van Herpt ECFC, (2003)..

3.4.1.2. Resina *Epóxi*

São polímeros termoestáveis obtidos através de uma reação química entre epíclodina e bisfenol e exibem em sua molécula grupos formados pela ligação entre um átomo de oxigênio e dois de carbono, que são chamados de grupos etoxilínicos ou epóxi. Na Figura 19, observamos a representação de uma molécula *epóxi* éter diglicidil de bisfenol A, comumente conhecida pela sigla DGEBA, que figura entre as mais utilizadas na indústria de compósitos.

Figura 19 - Representação de uma molécula epóxi DGEBA.



3.5. CURA DE MATRIZES TERMOFÍXAS

Quando as quantidades proporcionais de resina e agentes de cura são misturadas promovem a formação de ligações cruzadas tridimensionais. Quando todas estas ligações são formadas, há então a cura completa da matriz, que adquire resistência mecânica e química. Martinez (2011) comenta que é uma etapa crucial na consolidação da estrutura de um laminado, pois há grandes mudanças de temperatura, viscosidade, densidade que pode trazer defeitos como o surgimento de tensões residuais.

Quatro etapas caracterizam o processo de cura das matrizes poliméricas, como pode ser observado na Tabela 3:

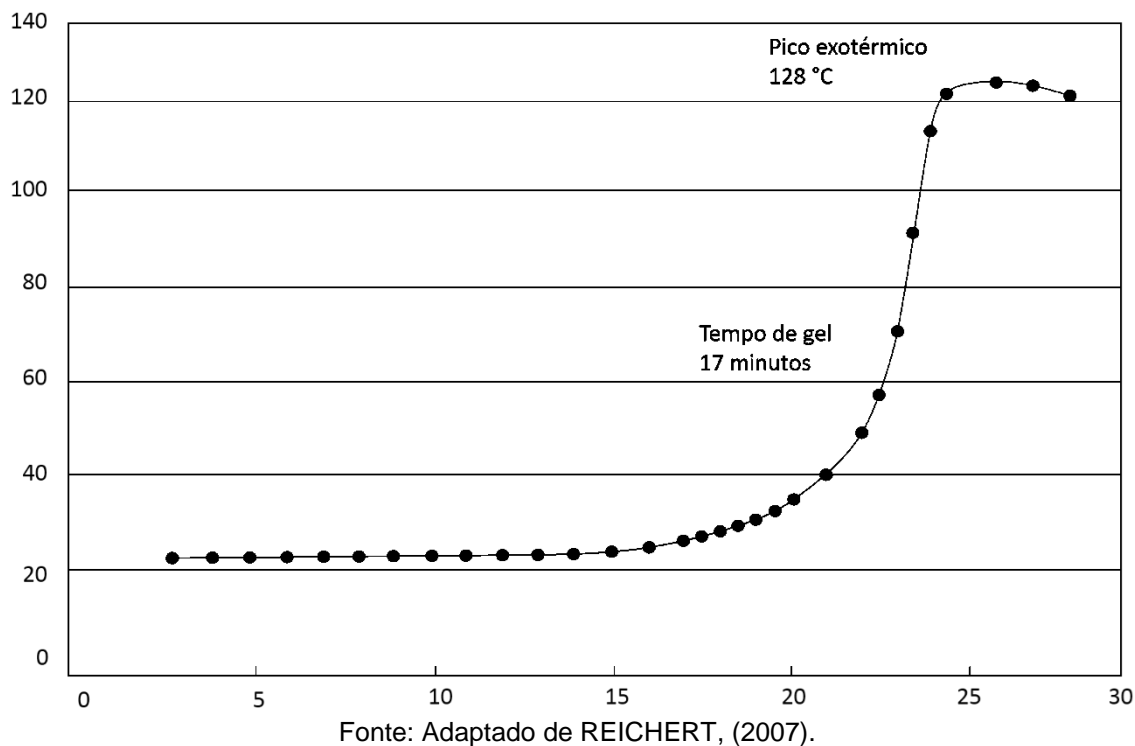
Tabela 3 - Etapas do Processo de Cura de Matrizes Poliméricas.

ETAPA	DESCRIÇÃO
1. Tempo de Gel (<i>Gel Time</i>) ou Tempo de Trabalho.	É nesse intervalo, o qual a temperatura da matriz quase não varia, mantendo sua consistência, que a impregnação da fibra deve ocorrer;
2. Pico Exotérmico.	Temperatura máxima atingida pela resina durante a reação exotérmica;
3. Tempo de Desmoldagem.	Intervalo no qual a peça pode ser desmoldada sem que ocorra empenamentos ou distorções;
4. Tempo de Cura.	Tempo necessário para a matriz completar suas ligações cruzadas;

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 20 apresenta um perfil de cura de uma matriz termofixa:

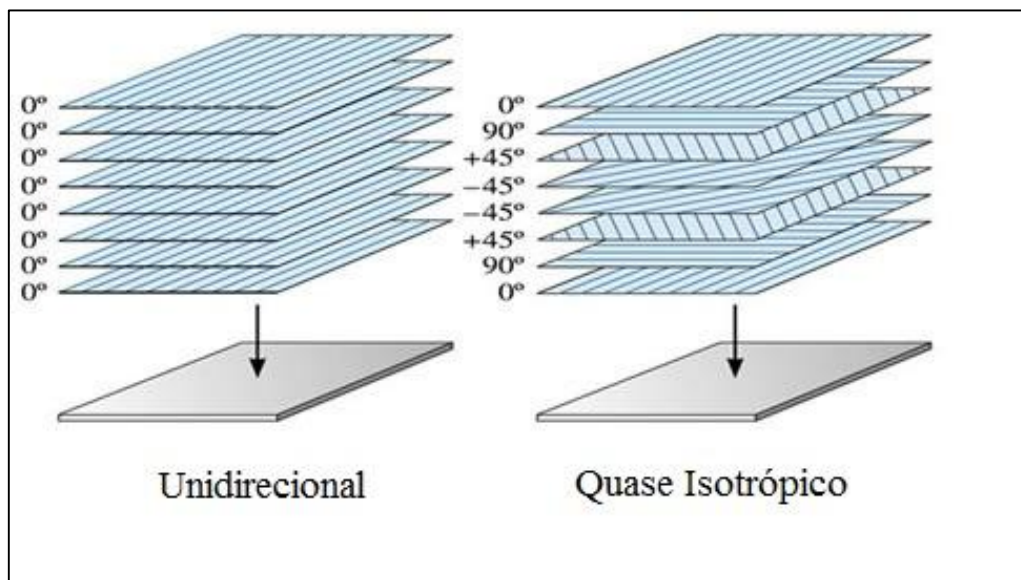
Figura 20 - Curva Típica de Cura de uma Resina Poliéster/MEKP/Cobalto a 25 °C.



3.6. REFORÇO FIBROSO

Estando uma estrutura compósita sob a ação de um carregamento, seja ele estático, dinâmico ou combinado, o reforço é o componente responsável por conferir as elevadas propriedades específicas, como resistência e módulo de elasticidade na direção da fibra. Estas propriedades são influenciadas, pela disposição da fibra em uma ou mais direções, por seu tipo e pela sequência de empilhamento, do inglês *layup* (Figura 21), definida no projeto do laminado.

Figura 21 – Sequência de empilhamento.



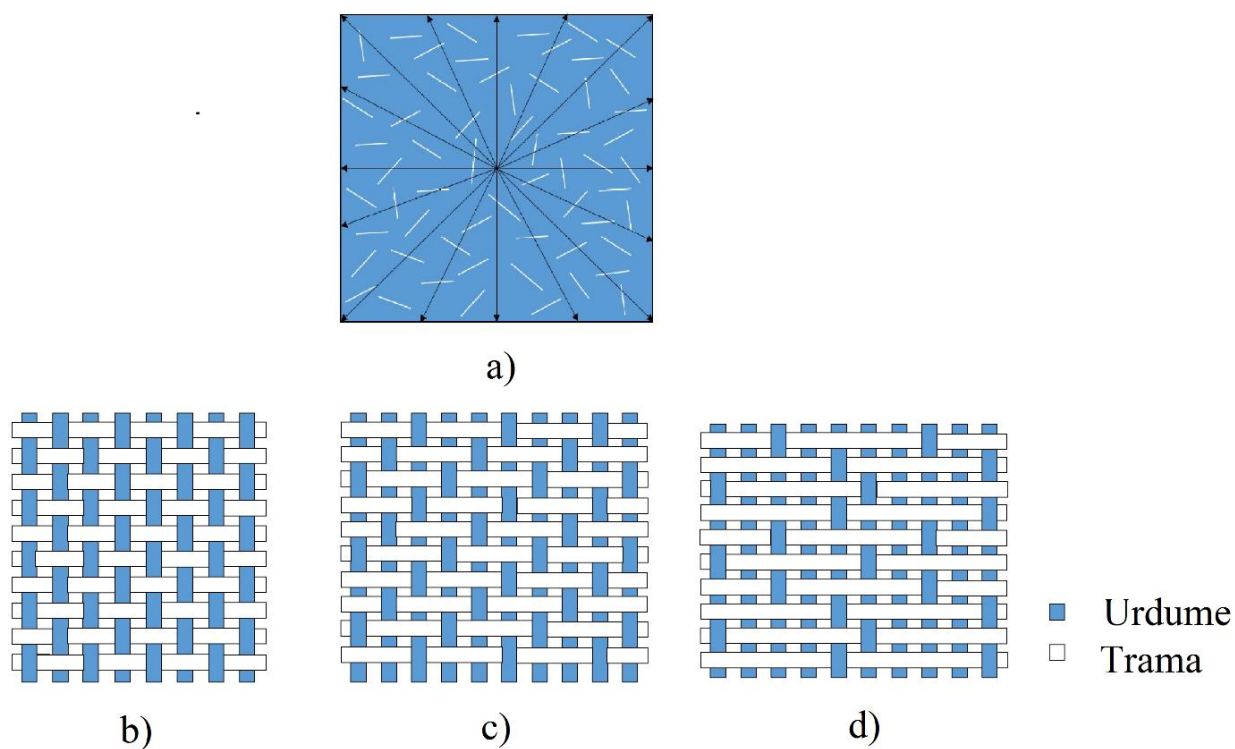
Fonte: Autoria Própria.

Para Mirabel et al., (2011), o reforço fibroso é o principal constituinte do compósito e ocupa a maior fração volumétrica do material e conforme Mendonça (2005) uma das razões para o uso de fibras como reforço consiste no fato conhecido experimentalmente de que a resistência e rigidez de um material, quando em forma de fibra, são algumas ordens de magnitude maiores que os valores obtidos para o mesmo material em bloco. Como exemplo, o vidro comum de janela que apresenta 0,7GPa de limite de resistência a ruptura e em forma de fibra, sua resistência pode chegar à valores de 4,6 GPa.

Os elementos de reforço mais utilizados na indústria de compósitos hoje são as Fibras de vidro, fibras aramida e fibras de carbono, que são apresentadas em formas de mantas ou tecidos, cujos principais tipos são: tecidos básicos, sarjas e cetins.

Vide Figura 22:

Figura 22 - Manta: a), Tipos de Tecido, b) Tecido Básico, c) Sarja e d) Cetim.



Fonte: Autoria Própria.

Conforme Amorim (2007), em geral as fibras selecionadas para o RTM devem atender as seguintes condições:

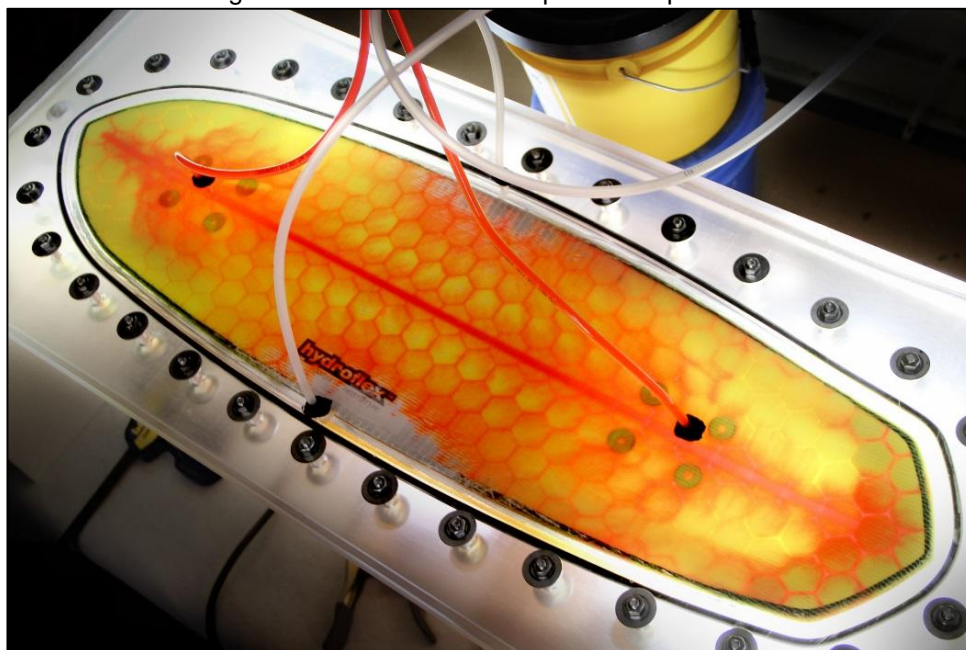
- Resistência mecânica e rigidez adequada;
- Interação fibra/matriz – boa molhabilidade e adesão;
- Permeabilidade adequada;
- Conformabilidade;
- Durabilidade.

Além dos tipos de fibra já mencionados, podem ser feitas combinações entre eles, dando origem a compósitos híbridos, que são utilizados em aplicações específicas.

3.7. MOLDE

Para o projeto e concepção de um componente por RTM, além da seleção da resina, fibra, sua arquitetura, da seleção ou desenvolvimento de um sistema injetor adequado, é necessário também um molde apropriado na Figura 23. Em grande parcela do processo, o molde é responsável pela produtividade e qualidade no que tange a eliminação de empenos, preenchimento completo da pré-forma e do acabamento superficial do produto.

Figura 23 - Molde de Skate produzido por RTM.



Fonte: hydroflex™, (2014).

O ponto chave para a construção de um bom molde está centrado na sua tecnologia de confecção. Partindo desse pressuposto os parâmetros que devem ser considerados, segundo Peterhans (2013) são: geometria da peça, volume diário, acabamento superficial necessário, tipo de resina utilizado, propriedades mecânicas exigidas, temperatura de operação e o número de peças a ser moldado durante a vida do projeto. Conforme a abordagem de Amorim (2007) a máxima pressão no interior do molde é um outro parâmetro a ser considerado.

Uma vasta gama de materiais pode ser utilizado para a confecção do molde, tais como: alumínio laminado, aço, níquel, compósito de fibra de vidro, resina *epoxy*, laminados *epoxy*/poliéster, acrílico. Partindo desta premissa, Steenkamer (1994) condensa em uma planilha (Tabela 4) uma visão geral de alguns materiais utilizados na confecção do molde e pontua de 1 a 10 critérios como: custo, condutividade térmica, durabilidade e qualidade superficial.

Tabela 4 - Materiais de Moldes para RTM.

Materiais Usados	Custo	Condutividade Térmica	Durabilidade	Qualidade Superficial
Aço	10	5	10	10
Níquel	9	5	8	10
Alumínio	8	10	6	7
Laminado Polimérico	5	4	5	7

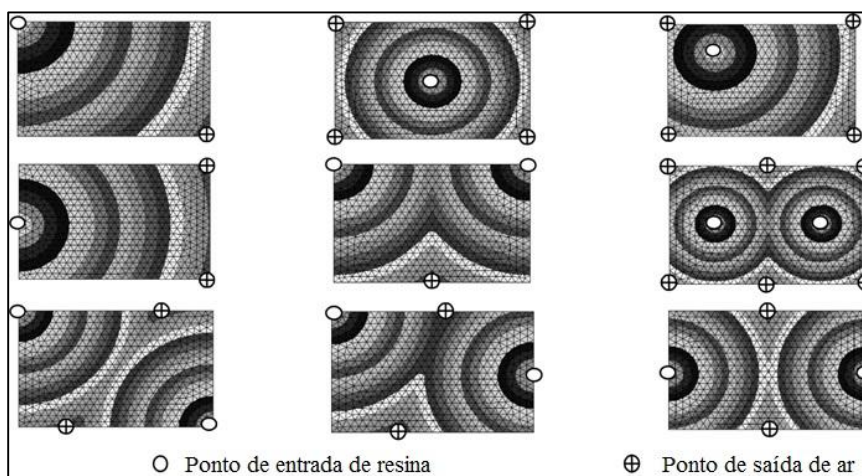
Fonte: Steenkamer, (1994).

No RTM, a localização das entradas e saídas de resina é uma das mais importantes variáveis no projeto do processo, pois tem um grande impacto no tempo de preenchimento do molde, no formato da frente de fluxo de resina, e pode afetar, positiva ou negativamente a eficiência do processo e a qualidade do produto final (JIANG, 2002).

Amorim (2007) comenta que a escolha do tipo, dimensões, posicionamento e quantidade de pontos de entrada dependem da geometria da peça, tipo de resina e da permeabilidade da pré-forma. As saídas de ar devem ser estrategicamente projetadas para expulsar o ar para fora do molde e em geral são colocados em pontos opostos ao fluxo da resina.

A Figura 24 apresenta a variação da frente de fluxo de acordo com o posicionamento dos pontos de injeção e de saída de ar:

Figura 24 - Simulações da Frente de Fluxo Variando Ponto de Injeção e de Saída.

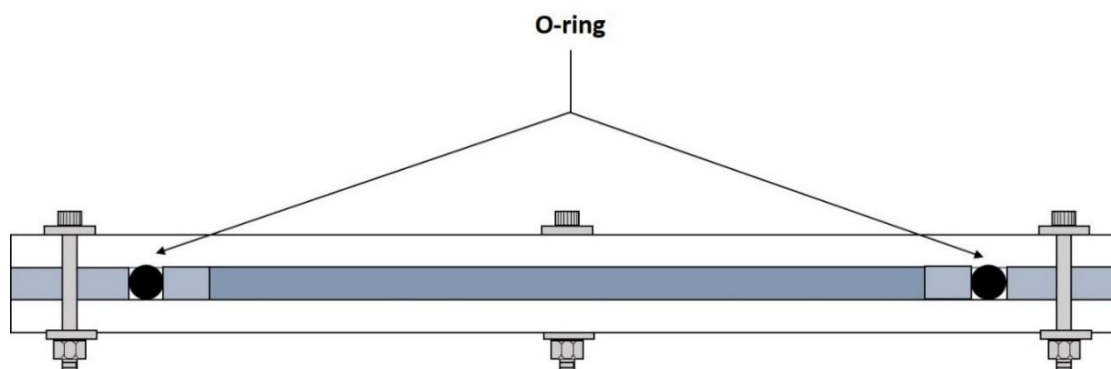


Fonte: Jiang et al., (2002) .

Pela baixa viscosidade das resinas empregadas no processo, é de fundamental importância o bom dimensionamento da vedação. O tipo de vedação e seu material pode variar de acordo com a geometria da peça e a pressão que deve ser suportada. Geralmente são utilizados anéis de vedação do tipo “O” do inglês “*O-ring*”, que podem ser de silicone, neoprene, entre outros.

A vedação deve estar situada entre o término da peça e os componentes de fixação do molde macho e fêmea, como pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 - Desenho Artístico da Vista Lateral em Corte de um Molde de RTM.



Fonte: Autoria Própria.

3.8. PERDA DE CARGA

A perda de carga é a energia perdida pela unidade de peso do fluido enquanto ele escoar. Em um tubo é a perda de energia dinâmica do fluido devido ao atrito com as paredes do meio em que ele está escoando e entre suas partículas (perda por atrito do tipo Moody).

A equação de Bernoulli (Eq. 1) contempla este fato adicionando um fator de perda de carga, h_{lt} (Perda de carga total), em seu equacionamento. Este fator é responsável por acrescentar a informação de desigualdade de energia total contida no fluxo em dois pontos distintos do sistema.

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_{lt} \quad (1)$$

Onde P_1 e P_2 são as pressões nos pontos de interesse (pa), ρ é a massa específica (kg/m^3), V a velocidade média do escoamento (m/s), g a aceleração da gravidade (m/s^2), z_1 e z_2 a altura que o fluido se encontra nos pontos de interesse (m).

Segundo White (2011), para qualquer sistema de tubulações, além da perda por atrito do tipo Moody chamadas de perdas distribuídas (h_l), calculada para todo o comprimento dos tubos, existem perdas adicionais chamadas de perdas localizadas (h_{lm}), sendo estas decorrentes de:

- Entradas e saída dos tubos;
- Expansões ou contrações bruscas;
- Válvulas abertas ou parcialmente fechadas;
- Expansões e contrações graduais;
- Curvas, cotovelos, têes e outros acessórios.

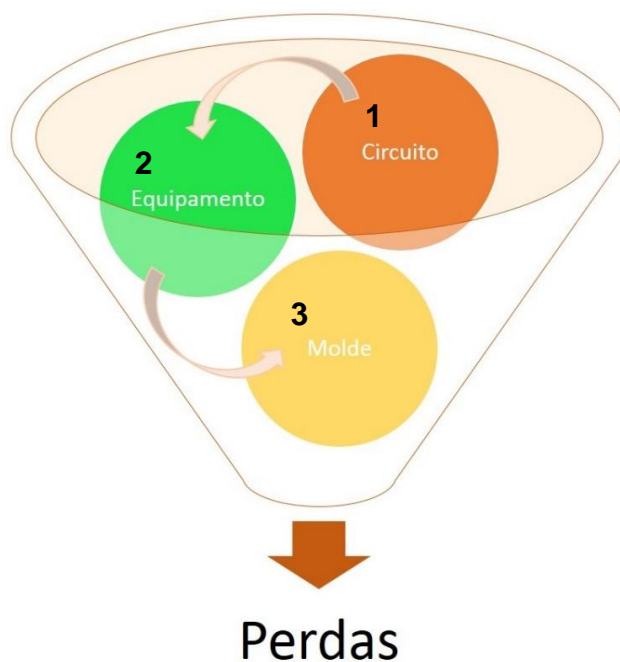
A perda de carga total (h_{lt}) de um sistema é a soma da perda distribuída e todas as perdas localizadas do sistema, conforme pode ser observado na Equação 2.

$$h_{lt} = h_l + \sum h_{lm} = \left(\zeta \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \right) + \left(K \frac{V^2}{2g} \right) = \frac{V^2}{2g} \left(\zeta \frac{L}{d} + \sum K \right) \quad (2)$$

Onde ζ é o fator de atrito, K o coeficiente de perda de carga localizada, ambos adimensionais, L o comprimento do tubo (m) e d o diâmetro do tubo (m). O fator de atrito relaciona os efeitos da rugosidade do tubo no escoamento. O coeficiente K tem um valor definido para uma vasta gama de agentes de perda localizada e geralmente decresce com o aumento do tamanho do tubo.

No processo RTM, verificam-se perdas de carga em até três estágios: do circuito de acionamento (quando o mesmo é pneumático ou hidráulico) até o equipamento, deste até o molde e dentro do molde (Figura 26).

Figura 26 - Perdas no processo RTM.



Fonte: Autoria Própria.

Para a concepção de um equipamento de injeção de resina por RTM, Amorim (2007) concentra seus estudos no segundo estágio (do equipamento ao molde), baseando-o no modelo analítico descrito na equação 2. O referido autor, ao analisar a relação entre a perda de carga e parâmetros de projeto, define quatro requisitos para um equipamento de RTM:

- Diminuição das perdas localizadas com o uso de um menor número possível de peças;
- Usar acessórios de menor perda de carga possível;
- Menor comprimento das mangueiras de injeção;
- Maior diâmetro das mangueiras de injeção.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados para o processamento das placas compósitas foram:

- Resina poliéster insaturada ortofitálica de média viscosidade *Arazyn 1.0 # 08 Ara Ashland*®. Suas características encontram-se dispostas na Tabela 4;
- Reforço: manta de fibra de vidro-E da OCV Capivari Fibras de Vidro Ltda, com gramatura de 450 g/m² e tecido básico de fibra de vidro-E, com gramatura de 600 g/m² fornecido pela *Redelease*®;
- Catalisador peróxido de metil-etil-cetona (P-MEK), *BUTANOX M-50 Akzo Nobel*;
- Desmoldante: Álcool Polivinílico (PVA) fornecido pela *Redelease*® e Cera *Tecglaze*® N a base de carnaúba.

Tabela 5 - Características da Resina Poliéster.

Descrição: Resina de poliéster insaturada, ortofitálica, de baixa reatividade, média viscosidade, tixotrópica, pré-acelerada, de cura rápida e uniforme durante a polimerização.		
Propriedades	Unidade	Valores
Viscosidade (25°C)	cP	170 - 210
Gel Time ^(*) (25°C)	min	10 - 14
Teor de Estireno	%	42 (valor máximo)
Teor de Sólidos	%	58
Pico Exotérmico	°C	170 (valor máximo)
Índice de Acidez	mg KOH/g	25
Intervalo de Pico	min	22 (valor máximo)

(*) Catálise para a obtenção do gel time: 100 g de resina pura à 25°C, com 1,0 c.c. de peróxido de metil etil cetona (Butanox M 50).

Fonte: Boletim técnico Ara Ashland®, (2014).

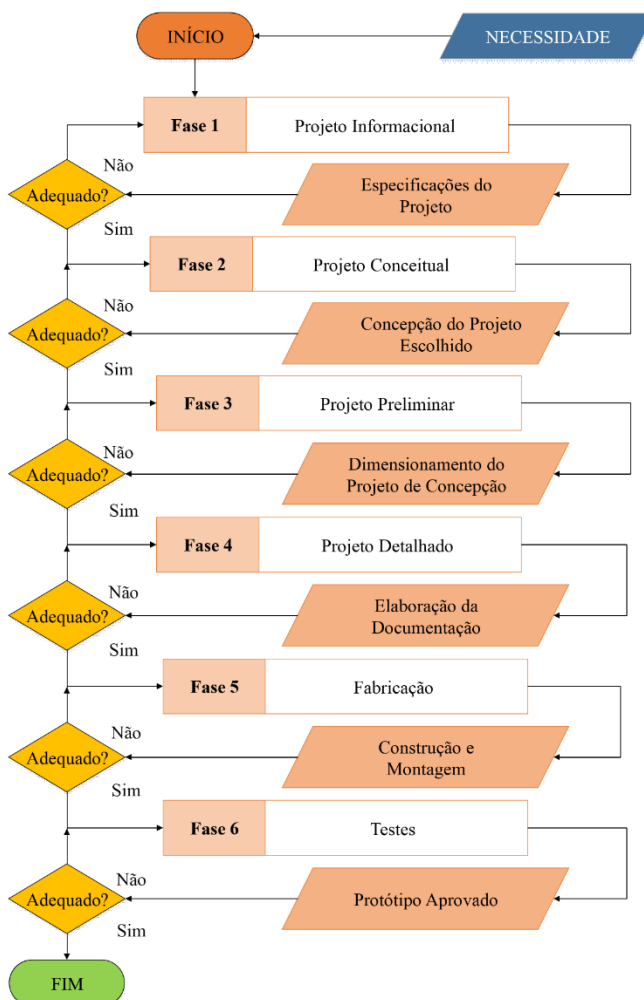
4.2. MÉTODOS

4.2.1. Metodologia de Projeto Utilizada para o Desenvolvimento do Equipamento

Um projeto de um equipamento é um processo especializado de resolução de problemas. Neste trabalho foi utilizada uma metodologia com uma série de fases principais, em uma sequência cronológica.

Na Figura 27 é possível observar o fluxograma da metodologia de projetos empregada, bem como suas principais fases.

Figura 27 - Fluxograma da metodologia de projetos adotada.



Fonte: Adaptado de Marimbondo, (2000).

Fase 1 - Projeto Informacional (Definição do Problema): trata-se da interpretação e a limitação dos requisitos disponíveis de forma clara e objetiva. Desta feita, reuniu-se um arcabouço de informações possivelmente necessárias para o desenvolvimento do equipamento. Realizou-se uma pesquisa extensa na busca de informações referentes aos requisitos do projeto do dispositivo a ser desenvolvido.

As fontes de informação para tal, foram: Levantamento de equipamentos de RTM disponíveis no mercado com foco em aspecto de projeto e funcionais dos mesmos; levantamento bibliográfico de artigo, dissertações, teses e livros, bem como de patentes de sistemas de injeção de resina;

Fase 2 - Projeto Conceitual: almeja-se representar da melhor forma possível, na forma de croquis, diagramas e desenhos técnicos a visualização da ideia que melhor atende à demanda do projeto estabelecida no projeto informacional;

Fase 3 - Projeto Preliminar: busca-se, por meio de cálculos e simulações numéricas estabelecer materiais, espessuras e melhores configurações que resistam aos esforços solicitados e especificações de projetos em conformidade;

Fase 4 - Projeto Detalhado: são estabelecidos os processos de fabricação de acordo com as normas vigentes no país, quando a segurança operacional e a confiabilidade do produto, assim, detalhando sua documentação para a futura construção do mesmo;

Fase 5 - Fabricação: Utilizam-se os recursos disponíveis para a fabricação e montagem, no que tange a obtenção da forma física estabelecida nas fases de projeto anteriores;

Fase 6 - Teste de Validação: São realizados testes para comprovar o atendimento do protótipo as especificações de projeto, por conseguinte, a demanda inicial.

4.2.2. Projeto e Fabricação do Suporte para Estudo do Escoamento no Molde

O suporte para o molde foi projetado para atender três requisitos importantes: fixar o molde de forma satisfatória, de modo a não permitir sua movimentação quando da injeção da resina; não permitir a deflexão das placas superior e inferior do molde e possibilitar total visualização da parte superior e inferior do molde. Sua concepção, elaborada no Autodesk Inventor® 2013 – Versão Estudante (Figura 28), foi baseada nos suportes apresentados por Amorim (2007) e Garay (2010).

Figura 28 – Concepção do suporte em perspectiva Isométrica.



Fonte: Autoria Própria.

A estrutura foi fabricada utilizando tubos de Metalon, cantoneiras, chapas de aço ASTM-1020, com as dimensões detalhadas em desenho técnico, conforme o ANEXO D.

A Figura 29 apresenta o suporte fabricado segundo a concepção desenvolvida, para tanto, foram necessários serviços de corte por serra, soldagem utilizando o processo a arco elétrico com eletrodo revestido, sendo utilizado o E6013 para as operações. Posteriormente foram realizados o acabamento e pintura da estrutura.

Para permitir a filmagem do escoamento foi posicionado um suporte para celular (Figura 29), possibilitando uma gravação perpendicular à frente de escoamento: superior e inferior do molde.

Figura 29 - Suporte do Molde Fabricado para Uso no Processamento por RTM.



Fonte: Autoria Própria.

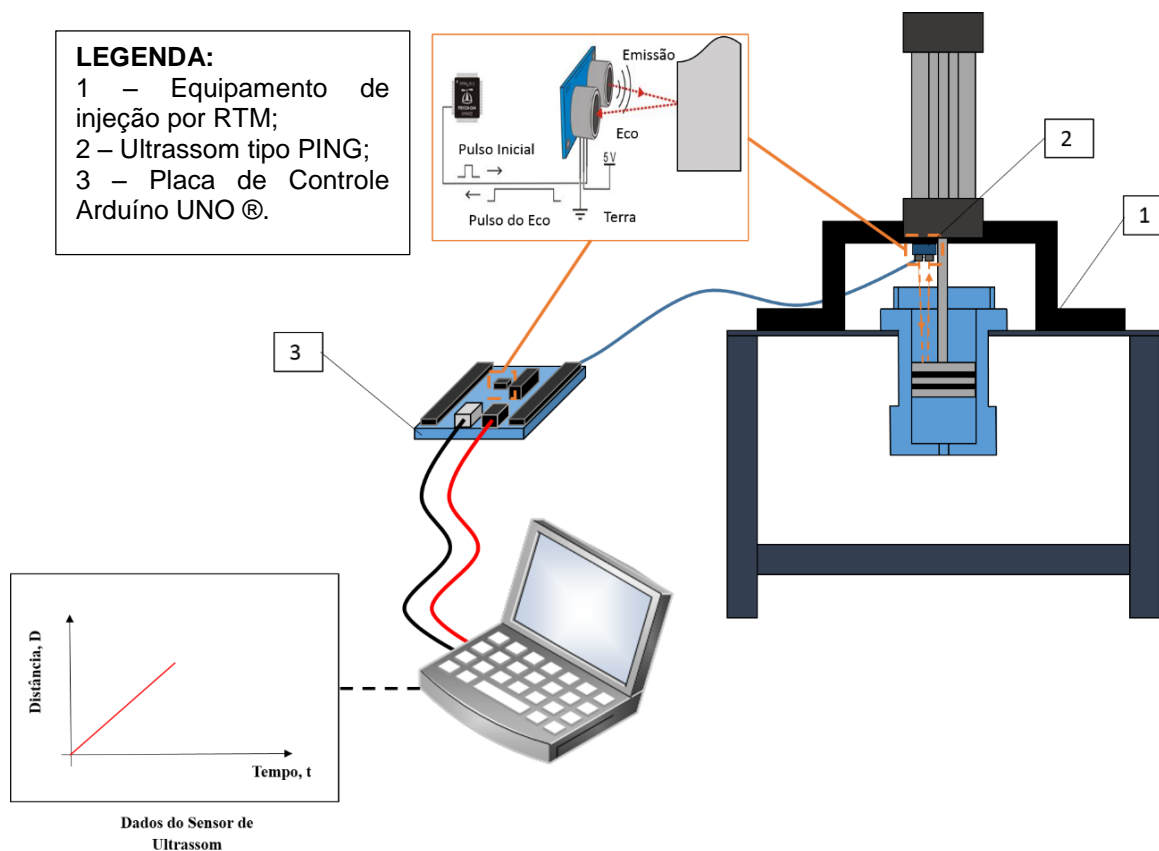
4.2.3. Metodologias de Avaliação da Estação de Processamento por RTM

A seguir são apresentadas as metodologias desenvolvidas e empregadas para a avaliação da estação de processamento concebida nesta dissertação.

4.2.3.1. *Teste de Medição da Velocidade de Avanço do Pistão Pneumático*

A Velocidade do pistão é dependente da pressão que é admitida no sistema pneumático, desta forma, para se ter uma ideia dessa dependência e, por conseguinte, das limitações da máquina projetada, foi realizada uma bateria de testes, segundo a metodologia desenvolvida para este fim (Figura 30).

Figura 30 - Montagem Utilizada para o Teste de Velocidade.



Fonte: Autoria Própria.

Foi utilizado um sensor de ultrassom do tipo PING, tendo o seguinte princípio de funcionamento: é enviada um sinal inicial através do microchip da placa de controle que é convertido em ultrassom, este é lançado através do emissor, se choca com o objeto e então retorna através de um eco para um receptor, que capta este sinal e o reenvia para o chip. Para que a saída seja lida em termos de Centímetros, um código foi desenvolvido pelo laboratório de vibrações da UFCG em linguagem FORTRAN com base em um código aberto disponível no ANEXO A, o que possibilitou também, o condicionamento para posterior tratamento dos dados, utilizando o *software Origin 8®*. Para evitar erro de paralaxe, o mesmo foi posicionado na base de sustentação do cilindro, perpendicular a face do êmbolo, de modo a permitir uma leitura correta do seu deslocamento.

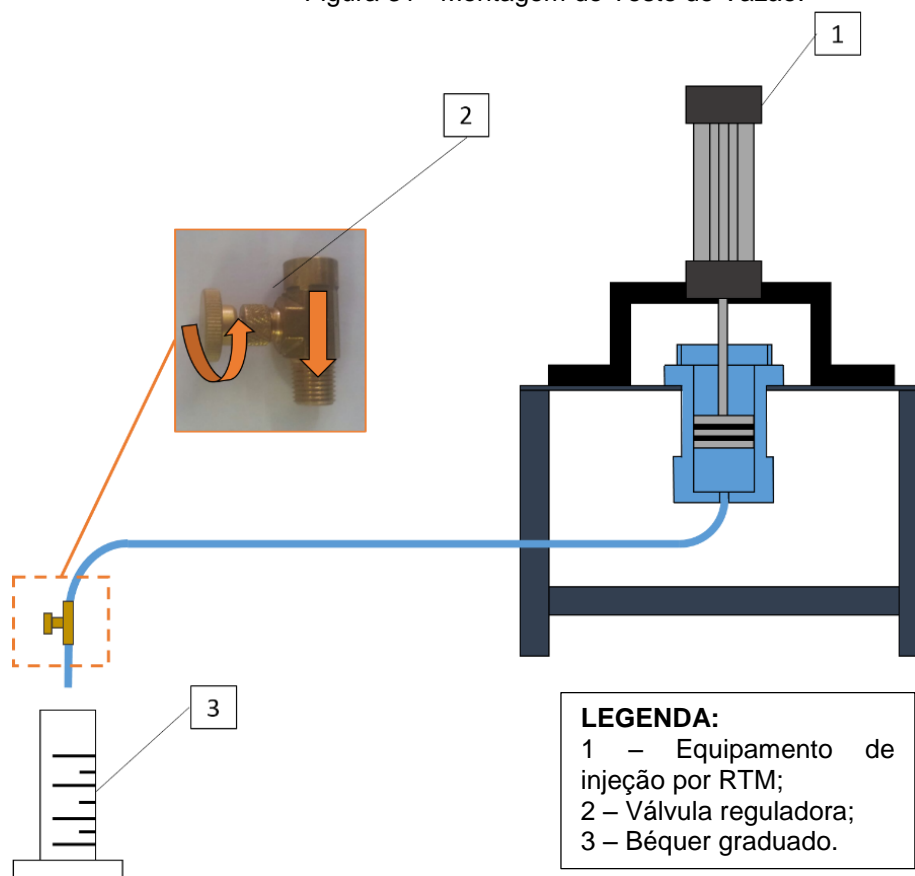
O comportamento do deslocamento do cilindro ao avançar foi medido em vazio, em uma hipótese de deslocamento sem atrito. Os testes foram realizados para pressões, na unidade de tratamento de ar – UTA variando de 1 a 6bar. Posteriormente, foram extraídos os dados de velocidade média para cada pressão correspondente.

4.2.3.2. *Teste de Medição da Vazão de Injeção*

A vazão de injeção é uma propriedade muito importante para um equipamento de injeção de resina por RTM, tendo em vista que essa propriedade tem influência direta no tempo de preenchimento do molde, bem como no tempo de fabricação de uma estrutura moldada por RTM.

Desta forma, foi desenvolvido um método (Figura 31) para a averiguação desta propriedade em termos de média, com relação a pressão do ar na linha medida pelo manômetro da UTA.

Figura 31 - Montagem do Teste de Vazão.



Fonte: Autoria Própria.

A tubulação de injeção é submetida a uma curva suave e posteriormente é colocada sobre uma superfície reta, em um nível mais próximo possível da saída da bomba. A abertura da válvula reguladora de fluxo de resina é ajustada na posição de teste. A saída da tubulação é fechada para evitar a saída de resina antes do início do teste. A bomba e a tubulação são preenchidas de resina e então o cilindro é acionado. Simultaneamente ao início da injeção, é disparado um cronômetro e aberta a saída da tubulação. O conteúdo é dispensado em um béquer graduado, que marca 500 ml, até que o mesmo atinja essa marca, onde então, o cronômetro é pausado e o cilindro é retornado. É então anotado o tempo do preenchimento.

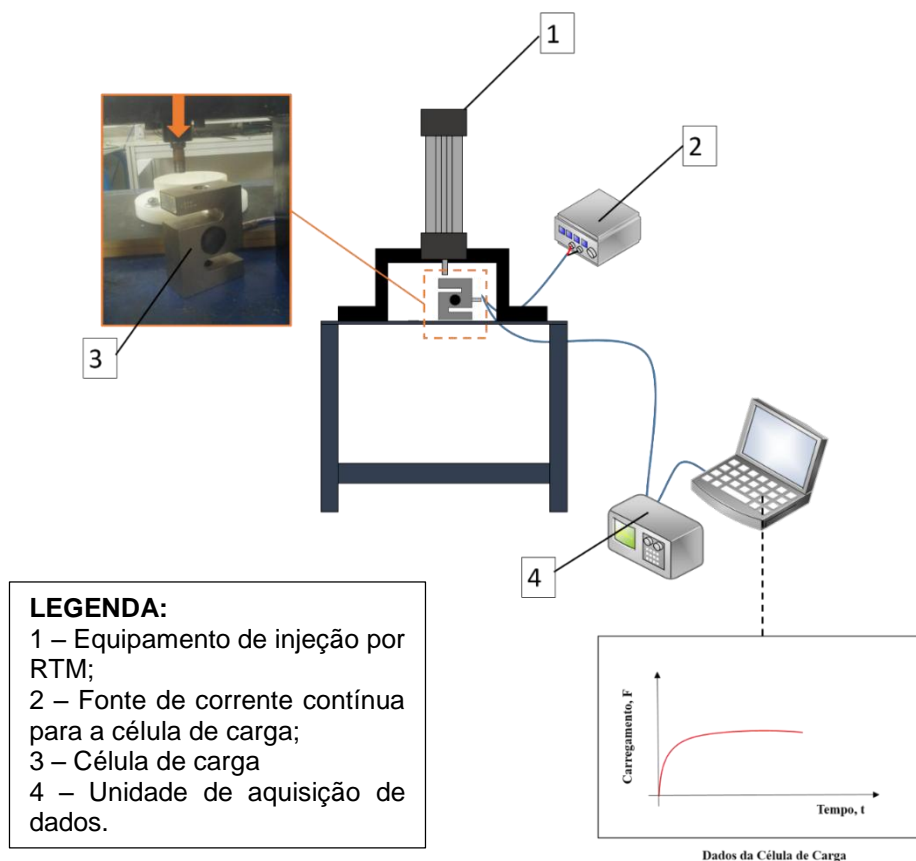
O procedimento é realizado para a pressão de 6bar, variando a abertura da válvula reguladora de fluxo de resina em duas posições: totalmente aberta e com uma volta de fechamento. São realizados 10 testes e extraída uma vazão média ($u_{\text{méd}}$) para cada condição.

4.2.3.3. *Teste da Força de Avanço Real do Cilindro Pneumático*

Para atestar a real magnitude da força de avanço do cilindro e por conseguinte, das pressões de trabalho do equipamento foi feita uma varredura, seguindo as condições de pressão de ar dos dois últimos testes (Seções 4.2.3.1 e 4.2.3.2).

A montagem está apresentada no esquema disposto na Figura 32:

Figura 32 - Montagem do Teste de Força.



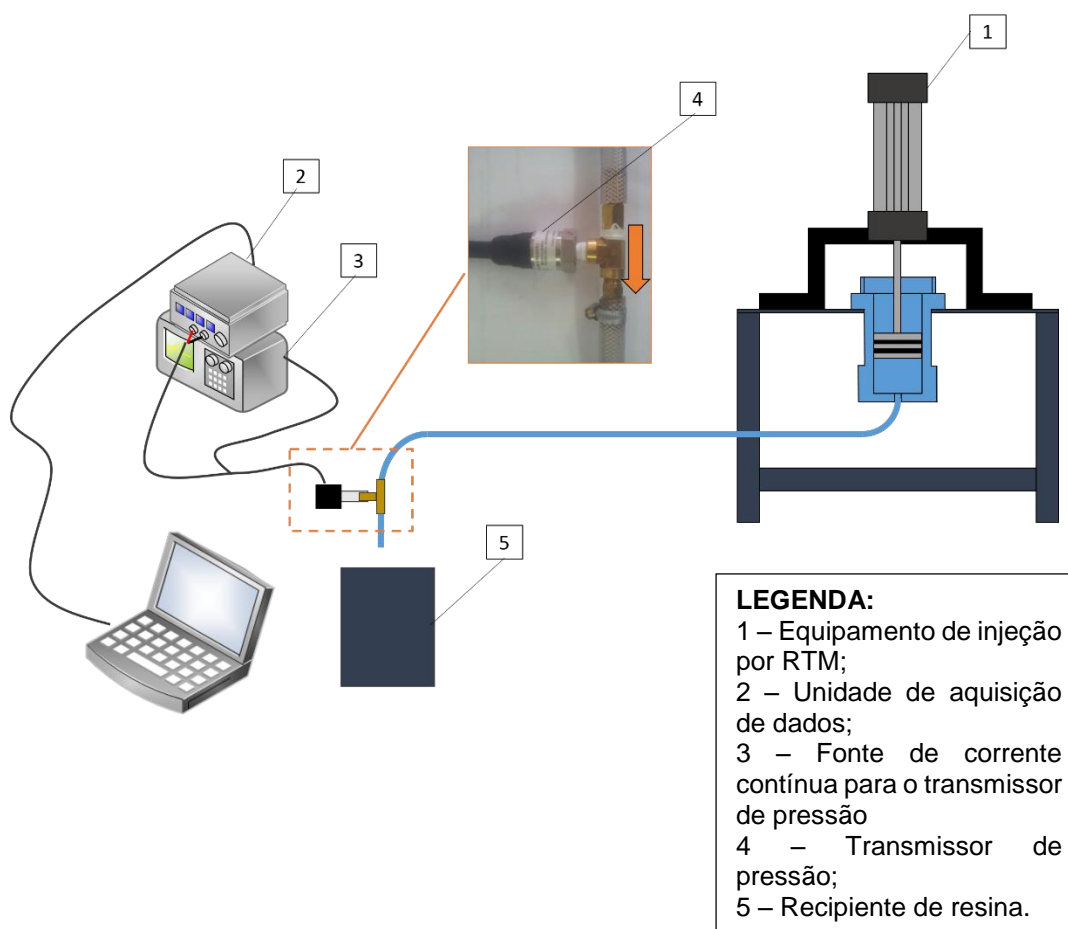
Fonte: Autoria Própria.

O cilindro é acionado até tocar a célula de carga tipo S, 5T da Alfa Instrumentos®, que é alimentada por uma fonte *Agilent* E3633A com controle de tensão de 5 mV, até um tempo de 40 segundos, quando o retorno é acionado, e então é cessada a carga. A aquisição dos dados é feita pela unidade de aquisição *Agilent* 34970A e por um computador munido com o *software* fornecido pelo fabricante do aparelho.

4.2.3.4. Teste das Pressões Máximas de Injeção

Para a averiguação experimental da capacidade do equipamento no que diz respeito a pressão de injeção foi utilizada a montagem apresentada na Figura 33:

Figura 33 - Montagem para Medição da Pressão de Injeção.



Fonte: Autoria Própria.

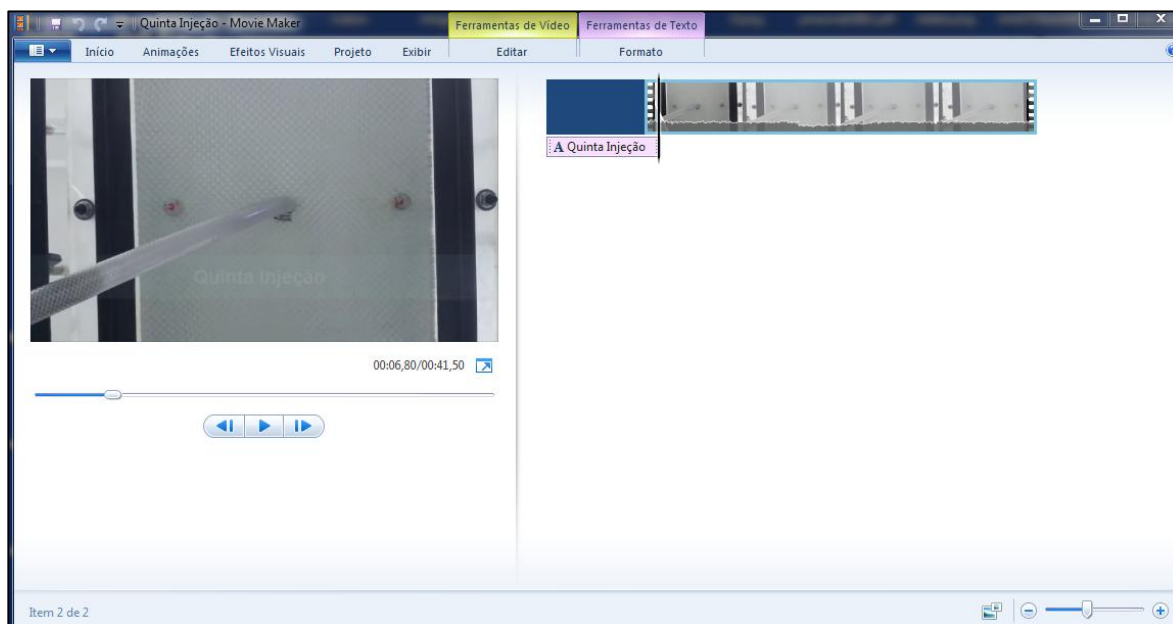
Foi realizado o ciclo de injeção em vazio, ou seja, sem a utilização do molde com a pré-forma. A bomba foi preenchida de água destilada e seu conteúdo, pressionado pelo pistão até o final do seu curso, foi dispensado em um recipiente de coleta. O teste foi realizado com a pressão máxima na UTA: 6bar. Não foi utilizado resina para o procedimento devido à complexidade imposta para posterior limpeza do transmissor de pressão. Foi definida e utilizada a água como fluido de teste para a pressão máxima do equipamento.

4.2.3.5. Avaliação do Escoamento de Resina no Molde

Foi realizada uma análise por vídeo com auxílio do *software Windows Movie Maker* 12 da frente de escoamento da resina no interior do molde, possibilitando atestar o perfil e as velocidades médias em y (V_y) e em x (V_x), desta feita, proporcionando o conhecimento do tempo exato de preenchimento do molde para o processo desenvolvido neste trabalho.

Na Figura 34 pode-se observar a interface com o usuário:

Figura 34 - Interface do Software Windows Movie Maker.



Fonte: Autoria Própria.

4.2.4. Metodologias de Avaliação das Placas Produzida por RTM

Nesta seção estão descritas as metodologias utilizadas para a avaliação das placas compósitas produzidas por RTM com a estação de processamento desenvolvida.

4.2.4.1. *Processamento das Placas por RTM*

Foram criados três cronogramas de atividades ou padrões operacionais, visando o estabelecimento de uma “receita” a ser seguida para que o processo, que nada mais é que um conjunto de atos ou métodos para se atingir um objetivo e que pudesse ser consolidado. Os cronogramas, dispostos em formato de tabela estão dispostos abaixo, sendo divididos em três etapas: Pré-processamento (Tabela 6), durante o processamento (Tabela 7) e depois do processamento por RTM (Tabela 8).

Tabela 6 - Atividades no Pré-processamento.

Atividades	
Cortar a Fibra	<ul style="list-style-type: none"> • Cortar o tecido com estilete;
Montar o Molde	<ul style="list-style-type: none"> • Limpar o molde com <i>tinner</i>; • Aplicar cera de carnaúba e realizar o polimento, repetindo o processo cinco vezes; • Aplicar duas camadas de PVA com intervalos de 20 minutos entre as aplicações; • Posicionar os separadores no molde; • Posicionar o <i>o-ring</i> no molde; • Posicionar a pré-forma na cavidade do molde;

	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar o fechamento com os conjuntos porca, parafuso e arruela; • Realizar o aperto “cruzado” dos conjuntos; • Propiciar a configuração de injeção escolhida; • Inspeccionar visualmente o conjunto.
Montar o Circuito Pneumático	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar a montagem do circuito no Laboratório; • Ligar o compressor; • Realizar o “<i>setup</i>” da pressão de ar na UTA; • Testar o circuito;
Montar o Equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionar a estrutura metálica; • Montar a bomba; • Aplicar cera de carnaúba na parte interna da camisa; • Posicionar o cilindro pneumático; • Montar o êmbolo; • Testar o avanço e retorno do cilindro; • Realizar o ajuste da vazão de ar da válvula reguladora de fluxo no avanço; • Inspeccionar visualmente o conjunto.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Atividades Durante o Processamento.

Atividades	
Posicionar o Molde	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionar o molde no suporte; • Posicionar os pedestais com as câmeras na parte inferior e superior;
Realizar Processamento	<ul style="list-style-type: none"> • Montar as mangueiras; • Inspeccionar toda a montagem do equipamento; • Inspeccionar pressão na UTA; • Posicionar reservatório de refugo de resina; • Preparar solução de resina e catalisador; • Depositar a solução na bomba; • Acionar o pistão; • Visualizar o preenchimento do molde; • Parar o pistão; • Estrangular a mangueira de injeção e realizar o corte com estilete; • Retornar o pistão; • Vedar as saídas de ar; • Vedar a entrada de resina; • Realizar três ciclos de limpeza do equipamento com solução de tinner e água (proporção de 50%); • Finalizar o processo.

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 - Atividades no pós-processamento.

Atividades	
Inspecionar Cura	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar verificação visual da cura da resina;
Desmoldar a Estrutura Compósita Produzida	<ul style="list-style-type: none"> • Remover os conjuntos de fixação; • Remover a estrutura compósita;
Realizar Manutenção no Molde	<ul style="list-style-type: none"> • Remover desmoldante com espátula; • Limpar o molde com solvente; • Lavar o molde com água e detergente; • Secar o molde; • Realizar inspeção tátil e visual;
Realizar Manutenção no Equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Desmontar o equipamento; • Realizar a Limpeza de todos os componentes da bomba com solvente; • Realizar inspeção tátil e visual.

Fonte: Autoria Própria.

4.2.4.2. Dimensionamento da Placa Produzida na Estação de Processamento Desenvolvida

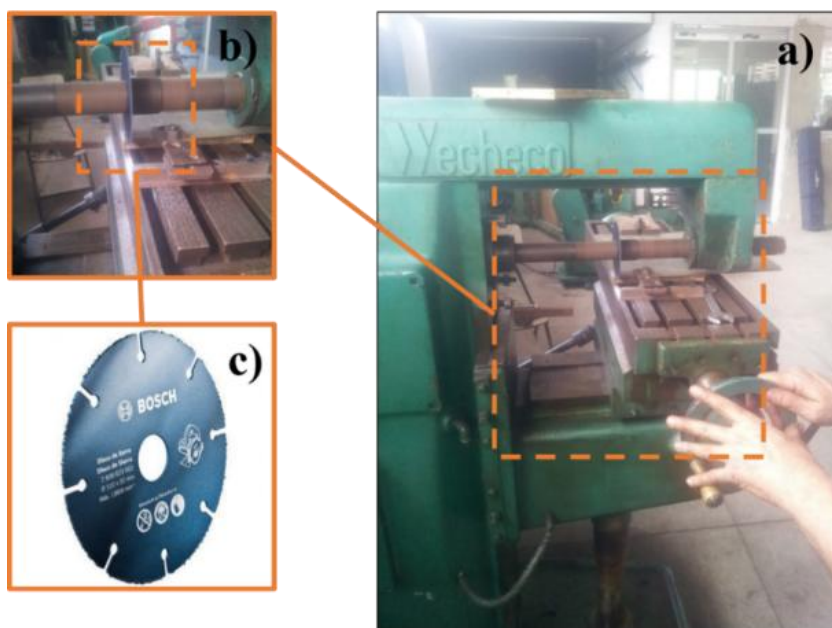
A averiguação das dimensões da placa foi realizada, tirando-se as medidas da largura, do comprimento e da espessura. As duas primeiras dimensões são medidas com uma régua graduada de precisão e a última com um paquímetro analógico ambos da marca *Vonder®*. Cada uma foi feita três vezes e tomadas suas médias. Suas dimensões se encontram nos quadros 11 e 12 na sessão de resultados e discussões.

4.2.4.3. Metodologia de Corte da Placa Produzida na Estação de Processamento Desenvolvida

Com o início da fase de caracterização mecânica foi determinado um procedimento para o corte das placas compósitas produzidas.

O corte foi realizado com uma fresadora universal *Wecheco*® FU-500 disponível na oficina mecânica do curso de Engenharia Mecânica da UFCG, munida de um disco de corte *Boch* 2 606 623 003 (Figura 35) que mostrou-se eficaz e preciso no corte da placa compósita, gerando um ótimo acabamento sem rebarbas, excluindo a operação de lixamento pós-corte.

Figura 35 - Metodologia de Corte: a) Fresadora universal *Wecheco*® FU-500, b) Corte de placa compósita e c) Disco utilizado.



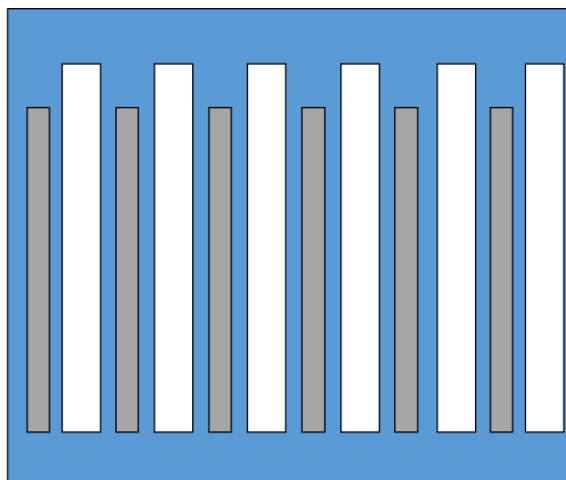
Fonte: Autoria Própria.

A placa produzida foi cortada da forma apresentada na Figura 36, propiciando uma análise da homogeneidade das propriedades, em toda a placa, obtidas pelos ensaios de flexão e tração.

LEGENDA

- Flexão
□ Tração

Figura 36 - Disposição dos Corpos de prova.



Fonte: Autoria Própria.

4.2.4.4. Caracterização Mecânica

Vários são os métodos de caracterização para a avaliação das propriedades mecânicas de materiais compósitos.

Como se observa na Tabela 9:

Tabela 9 - Métodos para avaliação das propriedades mecânicas de materiais compósitos.

Ensaio Mecânico	Observação
Tração	Predominam as propriedades da fibra
Compressão	Predominam as propriedades da fibra

Flexão	Estado de tensão compressivo e trativo
Charpy	Estado de tensão complexo: ruptura da fibra, da matriz, delaminação
Cisalhamento Interlaminar	Predominam as propriedades da interface fibra/matriz

Fonte: Amorim, (2007).

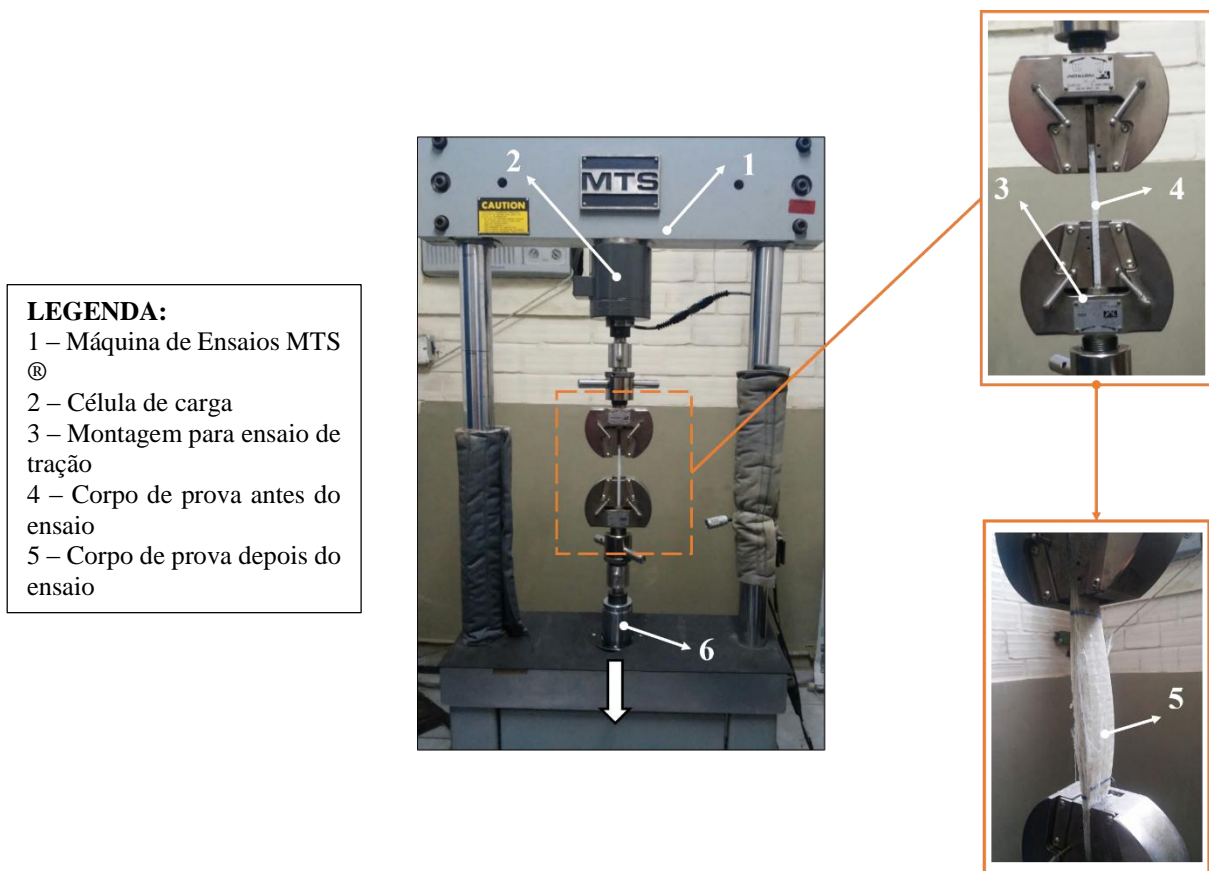
Para a caracterização mecânica da placa, foram realizados os ensaios disponíveis no LAMMEA: tração e flexão em três pontos.

4.2.4.5 *Ensaio de Tração*

O ensaio de tração seguiu as recomendações da norma ASTM D3039/D3039-14 que apresenta um método obtenção das propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica. O dimensionamento do corpo de prova se deu de acordo com a orientação da fibra - balanceada e simétrica – de formato retangular, com dimensões de largura, comprimento e espessura média, respectivamente de 25 mm x 250 mm x 5,7mm.

A sua montagem pode ser observada na Figura 37:

Figura 37 - Montagem para o Ensaio de Tração.



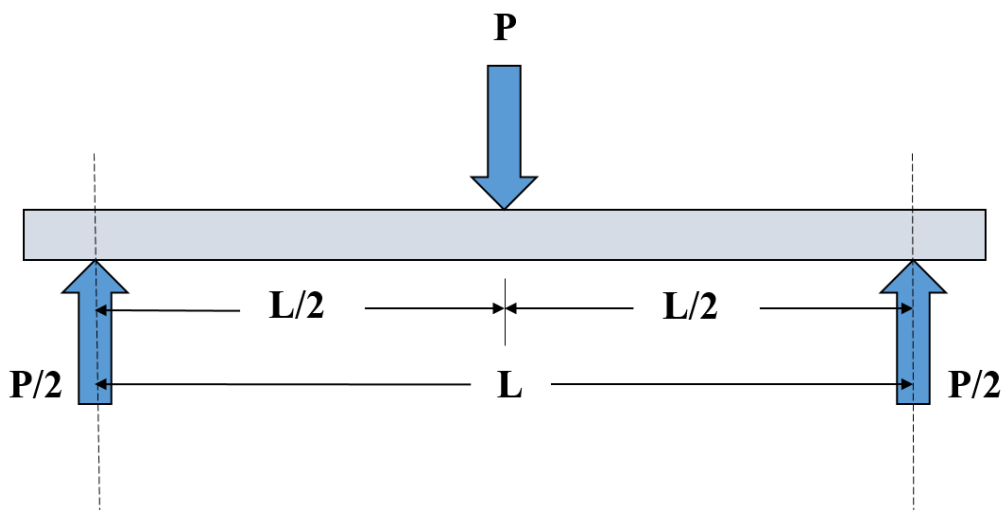
Fonte: Autoria Própria.

O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios servo hidráulica MTS® 810, com célula de carga de 100 KN, disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG, a uma taxa de deslocamento de 2mm/s, sem pré-carga. Foram realizados seis ensaios para a averiguação da homogeneidade de propriedades da placa. Foram medidas, ainda de acordo com a norma utilizada, a tensão máxima de tração ($\sigma_{\text{máx}}$) e a deformação de ruptura em porcentagem (ϵ_{rup}).

4.2.4.6 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão seguiu as recomendações da norma ASTM D7264/D7264M que apresenta um método obtenção das propriedades de flexão de compósitos de matriz polimérica. O dimensionamento do corpo de prova de acordo com a razão recomendada de 1/32 entre a espessura e o “*span*” (L). Assim, o corpo de prova de formato retangular contou com dimensões de largura (b), comprimento (L_f) e espessura média, respectivamente de 13 mm x 219 mm x 5,7 mm. A Figura 38 apresenta um diagrama de cargas no sistema de flexão em três pontos.

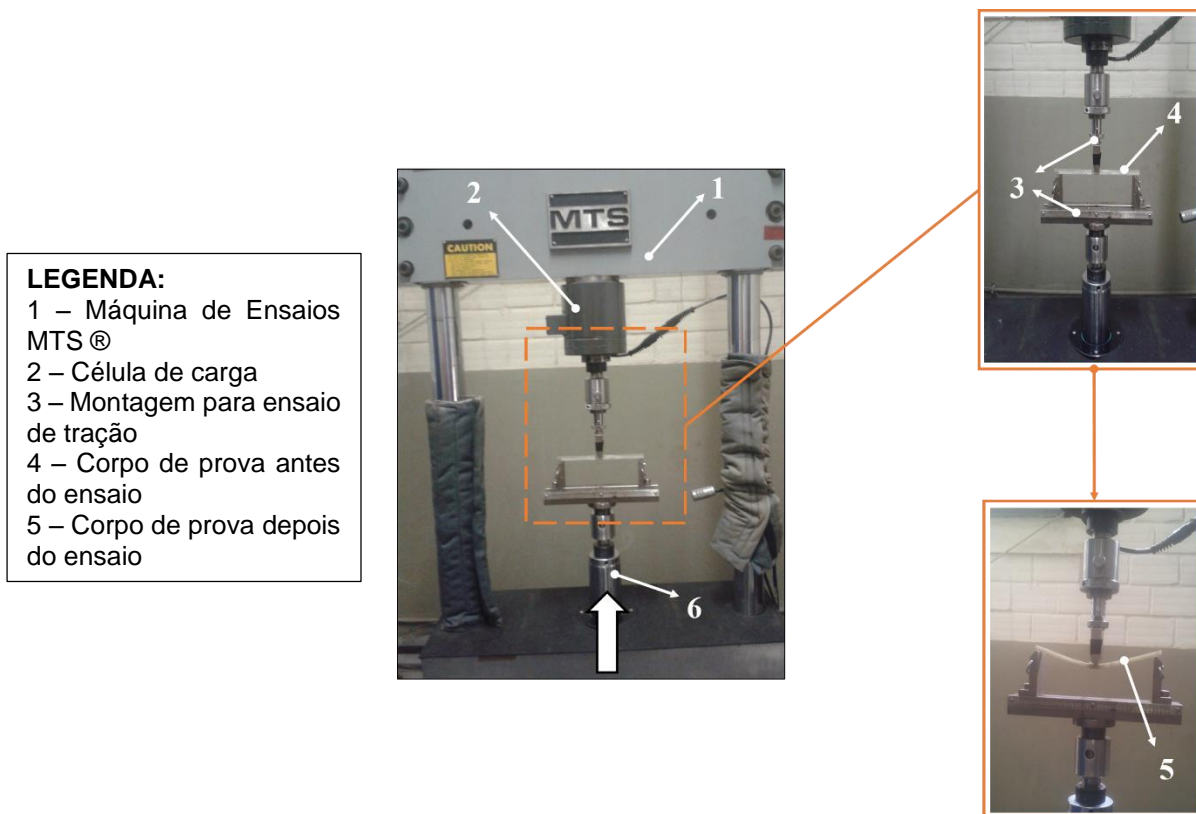
Figura 38 - Diagrama de Cargas.



Fonte: Adaptado da Norma ASTM D7264/D7264M, (2007).

A montagem para o ensaio de flexão pode ser observada na Figura 39:

Figura 39 - Montagem para o Ensaio de Flexão.



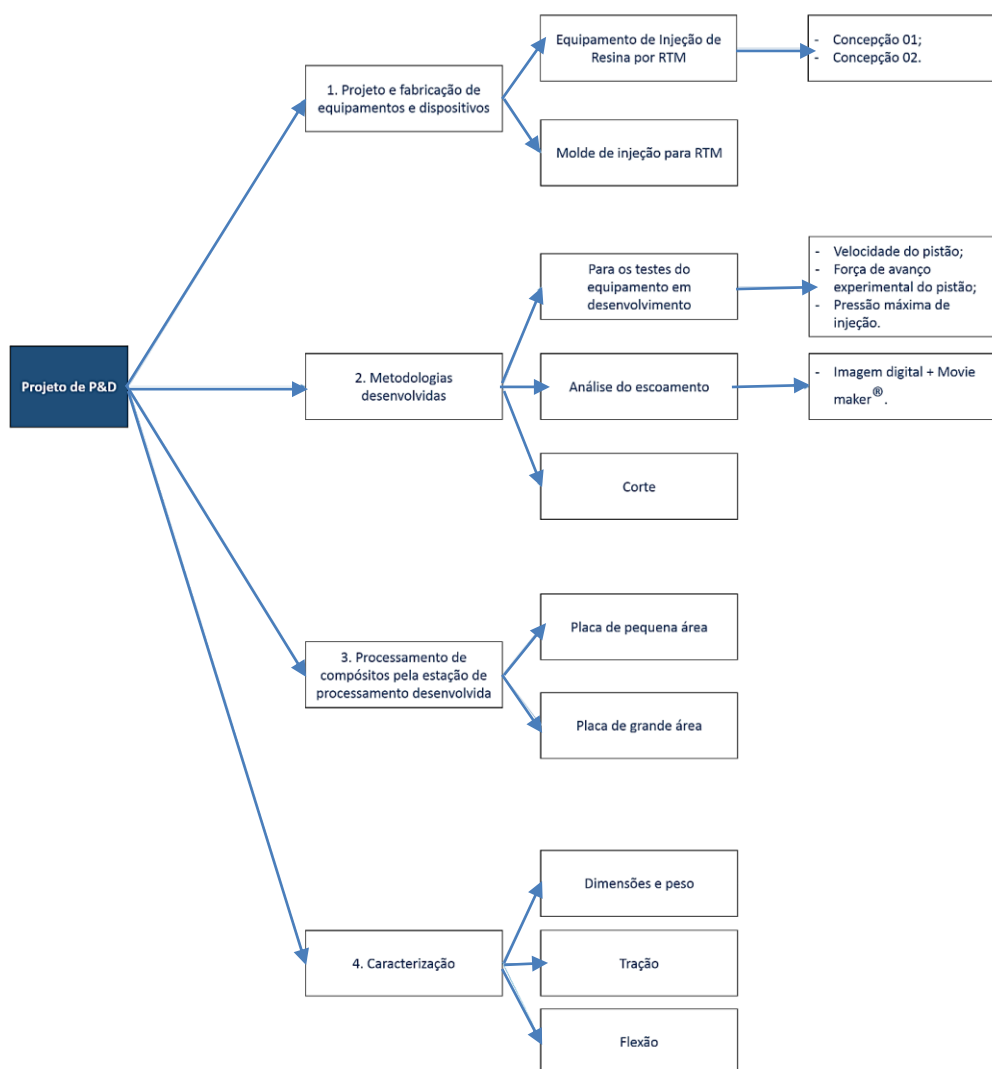
Fonte: Autoria Própria.

O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios MTS® 810 com célula de carga de 100 KN, disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG, a uma taxa de deslocamento de 1 mm/s, sem pré-carga. Foram realizados seis ensaios para a averiguação da homogeneidade de propriedades da placa. Foi medida ainda, de acordo com a norma utilizada, a carga máxima de flexão ($F_{\text{máx}}$).

4.3. FLUXOGRAMA DO PROJETO

Para o desenvolvimento da tecnologia empregada no projeto do equipamento e do processamento de placas compósitas por RTM, foi necessária a realização de uma série de procedimentos experimentais, o projeto e a fabricação de dispositivos e a utilização de metodologia para o entendimento do escoamento da resina no interior da pré-forma e caracterização mecânica das placas processadas. Para tanto, seguiu-se uma ordem lógica de atividades desenvolvidas as quais se encontram dispostas no fluxograma da Figura 40.

Figura 40 -Fluxograma das Atividades Desenvolvidas Neste Trabalho de Pesquisa.



Fonte: Autoria Própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. PROJETO INFORMACIONAL DO EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO DE RESINA RTM

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um equipamento de injeção de resina por RTM, que atenda as condições de processamento dispostas na literatura pesquisada, seja de baixo custo, de fácil fabricação. Os requisitos técnicos necessários para tal equipamento são: que seja facilmente transportável, uma vez que os moldes são, em sua maioria, fixos e muitas vezes de grandes dimensões; que resista aos esforços provenientes das cargas estáticas e dinâmicas inerentes ao processo; que seja capaz de injetar resina no molde dentro de uma faixa de pressão especificada. Para tanto, foi realizada uma pesquisa buscando informações referentes aos requisitos do projeto do dispositivo desenvolvido, estudando-se patentes, equipamentos disponíveis no mercado, artigos, dissertações, teses entre outras fontes.

Serão discutidos, dentro do projeto informacional, equipamentos, patentes e teses que cooperaram para a concepção do equipamento.

5.1.1. *Composite Integration Ciject™ ZERO*

Composite Integration Ciject™ ZERO (Figura 41) é um equipamento projetado para trabalhar em baixas faixas de pressão controladas eletronicamente entre 1,0 e 8,0bar. Possui dimensões 1216x721x616 mm.

Este modelo pode ser utilizado para o processamento de materiais compósitos nos processos RTM, RTM-light e VARTM.

Figura 41 - Composite Integration Ciject™ ZERO.



Fonte: Catálogo Comercial da Composite Integration Ciject™ ZERO, (2013).

O *Composite Integration Ciject™ ZERO* possui as seguintes características a saber:

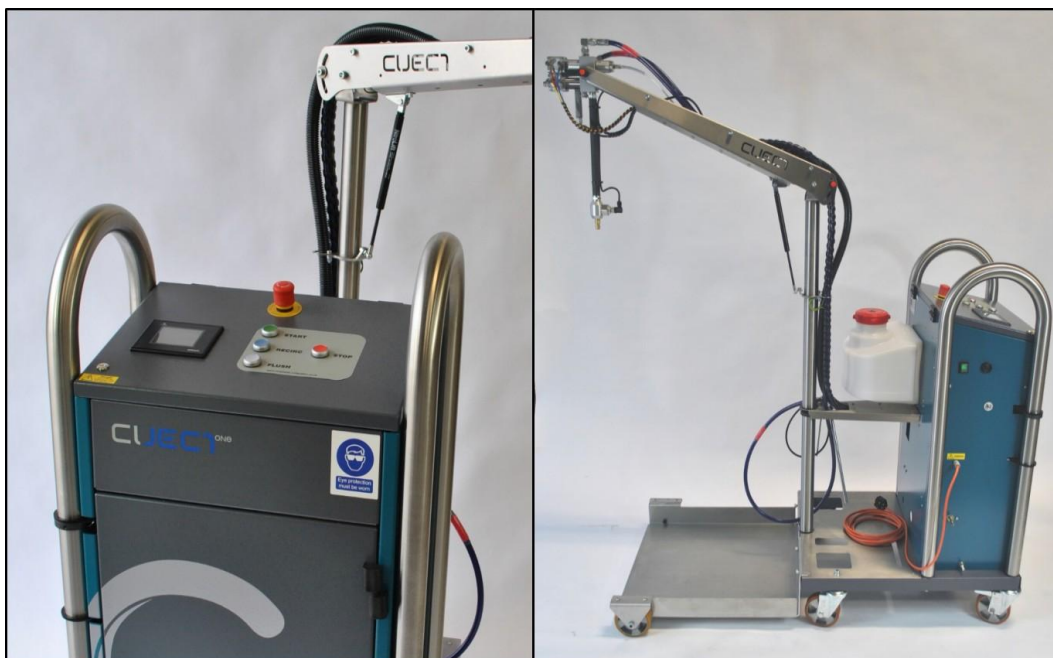
1. Bomba de deslocamento positivo de dupla ação com sistema de fácil dosagem de catalisador. Permite uma injeção de uma proporção de resina e catalisador constante tanto no avanço, quanto no retorno do pistão;
2. Possui uma cabeça misturadora automática para realizar a combinação adequada do catalisador com a resina;
3. Sistema de descarga solvente de baixo volume e não pressurizado, para garantir uma limpeza simples e rápida. Este é acionado, após o preenchimento do molde;
4. Velocidade de injeção ajustada manualmente;

5.1.2. *Composite Integration Ciject™ ONE*

Composite Integration Ciject™ ONE (Figura 42) é um equipamento também projetado para trabalhar em baixas faixas de pressão, controladas eletronicamente por um controlador proporcional integral derivativo – PID, via controlador lógico programável – CLP, esta faixa de pressões compreende valores entre 1,0 e 10,0bar. Possui dimensões 1262x724x1305 mm. Com a lança, a dimensão da altura pode chegar até 2000 mm.

Este modelo pode ser utilizado para o processamento de materiais compósitos nos processos RTM, RTM-light e VARTM.

Figura 42 - Composite Integration Ciject™ ZERO.



Fonte: Catálogo Comercial da Composite Integration Ciject™ ONE, (2013).

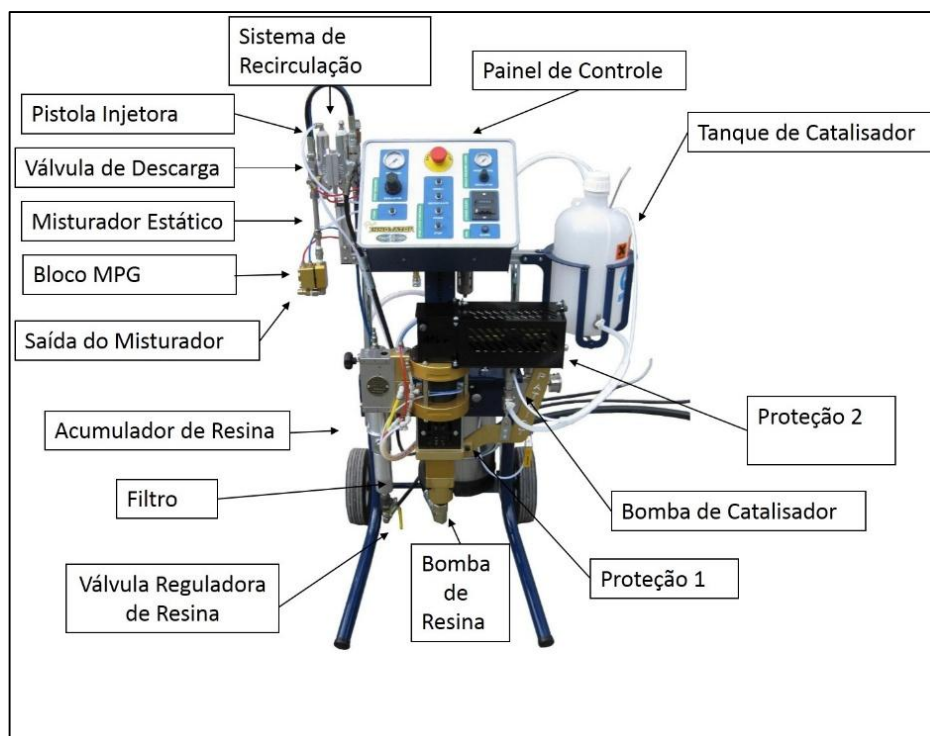
O *Composite Integration Ciject™ ONE* possui as seguintes características a saber:

1. Possui uma bomba de deslocamento positivo de dupla ação, com um sistema de fixação na estrutura diferenciado, que propicia uma fácil retirada da caixa para manutenção e seu retorno;
2. Controle PID com CLP e uma Interface colorida e sensível ao toque;
3. Possui mais de 20 configurações de injeção pré-estabelecidas;
4. Conta com um alarme de tempo de gel que soa quando é necessário dar um ciclo de descarga de solvente;
5. Lança para cabeamento e pistola injetora, estas servem para dar uma maior estabilidade ao conjunto e bem como propiciam uma maior organização no que diz respeito aos cabos e mangueiras de conexão.

5.1.3. *Magnum Venus Plastech™ Innovator Pro*

Magnum Venus Plastech™ Innovator Pro (Figura 43) abrange uma faixa de pressões de injeção mais ampla, que vai de 1 a 76 bar. Trata-se de um equipamento de acionamento eletropneumático, com simples automação (não possui CLP, nem tela sensível ao toque). É projetado para trabalhar com diversas resinas, sendo elas: Poliéster, Viniléster e Metacrilato.

Figura 43 - Magnum Venus Plastech™ Innovator Pro.



Fonte: Adaptado do catálogo comercial da Magnum Venus Plastech™, (2009).

Este equipamento possui as seguintes características relevantes:

1. Seu sistema pneumático propicia um controle automatizado, controlando o número de ciclos do pistão, a recirculação de resina e de catalisador, tornando o processo mais prático e eficiente.
2. Possui uma estrutura com rodízios e braços para realizar o transporte do equipamento ao molde;
3. Conta com alarme que soa quando o tempo de gel é atingido;
4. No que diz respeito ao corpo da bomba de resina, possui vedações com baixos coeficientes de atrito, reduzindo problemas com calor (expansão térmica) e atrito entre o mesmo e a parte interna da camisa;
5. O sistema conta com um *Mold Pressure Guard* – MPG, que nada mais é que uma válvula reguladora de pressão, que propicia um controle manual da máxima pressão de saída do misturador estático, assim, também, pode-se controlar a pressão de injeção do sistema.

5.1.4. GlasCraft® Spartan III

O GlasCraft® Spartan III (Figura 44) trabalha em uma faixa de pressões que vai de 1 – 89 bar. É um equipamento de acionamento pneumático, com uma bomba de deslocamento positivo de dupla ação controlada por CLP. É adequada para injeção de resinas Vinilester e poliéster

Figura 44 - GlasCraft® Spartan III.



Fonte: Catálogo Comercial GlasCraft® Spartan III, (2008).

Suas principais características são:

1. CLP com tela sensível ao toque integrada;
2. Possui um sistema de descarga de solvente diferenciado, podendo o ciclo ser pré-programado, ainda podendo ser combinado com uma purga de ar no sistema, para uma limpeza mais profunda do sistema misturador;

3. Possibilita programar o *setup* de todos os moldes da fábrica com parâmetros, tais quais: quantidade de resina necessária, pressão de injeção e quantidade de catalisador na mistura;
4. Possui um diferencial dos equipamentos anteriores, o ajuste de catalisador na mistura é feito de forma automática, no *setup* dos parâmetros de injeção.

5.1.5. Pistão de Injeção da ISOJET® Equipements

O referido equipamento de injeção representado na Figura 45, contempla uma faixa de pressão que pode ir de 0 – 25 ou de 0 – 30 bar, dependendo do modelo do equipamento, com uma faixa de vazão que varia de 0 – 1000 cc/min. Volume do pistão pode ir de 0,5 à 30 litros.

Figura 45 - Pistão de Injeção da ISOJET® Equipements.



Fonte: Ficha técnica do Pistão ISOJET, (2014).

O equipamento representado possui as seguintes características importantes:

1. Possui uma bomba de deslocamento positivo de simples ação, acionada por um servo motor, que aciona o mecanismo de transformação de movimento rotativo em alternativo, gerando um controle mais fino tanto do volume, quanto da pressão de injeção e da vazão volumétrica;
2. Sua IHM é um computador que consta de um *software* próprio, onde todas as informações da injeção (os *setups* de temperatura da linha, vazão, pressão) são armazenados em forma de dados. O processo pode ser acompanhado em tempo real por gráficos gerados pelo *software*;
3. A linha de injeção pode ser aquecida e a temperatura da resina controlada até 300 °C;
4. A solução fluida é feita externamente ao equipamento e dispensada no cilindro.
5. A limpeza do equipamento é realizada somente nas vedações do embolo de injeção;
6. O equipamento consta ainda com uma bomba de vácuo para auxiliar em processos como o RTM-light, VARTM, entre outros.

5.1.6. Radius® 2100cc Pneumatic RTM Injection System

O *Radius 2100cc Pneumatic RTM Injection System* (Figura 45) dispõe uma faixa de pressão que vai de 0 – 17 bar, linha e cilindro que podem ser aquecidos até uma temperatura de 180° C, pistão de alumínio projetado para ser selado por vácuo com 2,1 l de capacidade volumétrica.

Figura 46 - Radius 2100cc Pneumatic RTM Injection System.



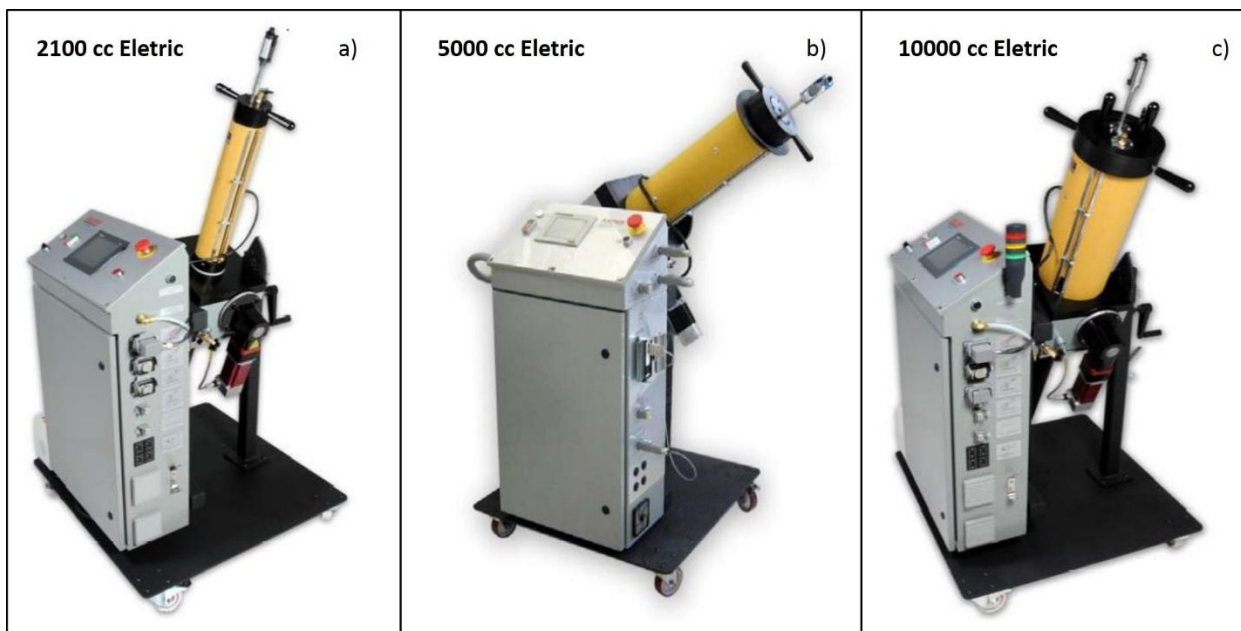
Fonte: Catálogo Radius, (2011).

O equipamento demonstrado na Figura 45 possui as seguintes características relevantes:

1. CLP com tela colorida sensível ao toque que permite o *setup* e acompanhamento de todos os parâmetros de injeção que podem ser gravados no disco rígido;
2. O operador pode criar, gravar e reutilizar receitas de injeções anteriores;
3. Estrutura metálica com mecanismo para ajuste da inclinação do pistão para injeção e para facilitar a limpeza do mesmo;
4. A mistura fluida, tal como no equipamento anterior, é feita externamente ao equipamento e dispensada no cilindro que tem posição ajustável;
5. Acionamento pneumático.

A empresa *Radius* oferece ao mercado outras opções de equipamentos de injeção para acionamento via servo-motor (Figura 46) propiciando diferentes faixas de pressão de injeção, capacidade volumétrica e um controle de fluxo mais apurado, mas contando com praticamente os mesmos recursos que o modelo *Radius 2100cc Pneumatic RTM Injection System*, por isso os mesmos não serão pormenorizados neste tópico.

Figura 47 - Equipamentos de Injeção Radius: a) 2100cc, b) 5000 cc e c) 10000cc.



Fonte: Catálogo Radius, (2011).

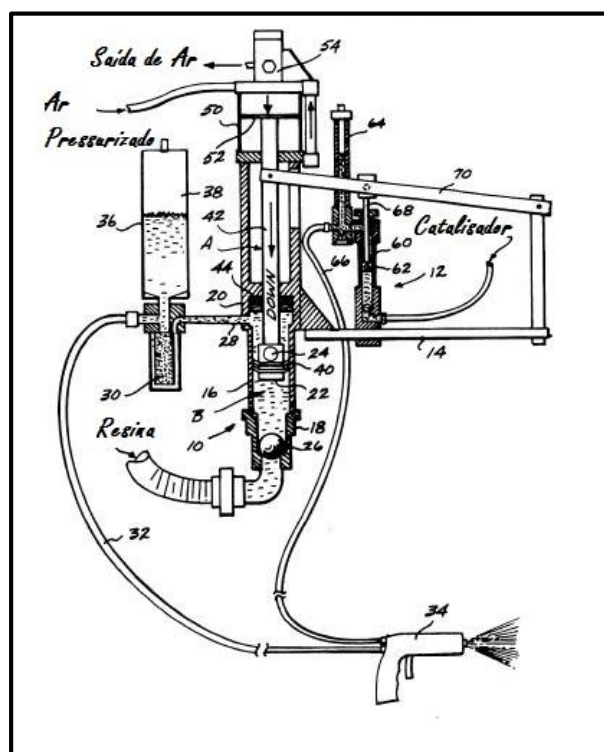
5.1.6.1. Bomba de Deslocamento Positivo de Dupla Ação: Patente Nº EP 0451942 A1

A referida patente trata de uma concepção muito utilizada na indústria RTM: a bomba de deslocamento positivo de dupla ação (Figura 47). A grande maioria dos equipamentos utilizados para o RTM convencional e suas variações a baixas pressões, com algumas particularidades para cada equipamento. Seu princípio de funcionamento é bem simples: o pistão pneumático é acionado, avançando o cilindro e todo o fluido que está na câmara inferior é dispensado na câmara superior por meio de uma comunicação

no êmbolo do pistão, esta, por contar com um menor volume pelo volume ocupado pelo eixo, induz, por diferença de pressão, o escoamento do fluido para o acumulador.

Acontece de forma similar com a bomba escrava, assim chamada por seu acionamento depender diretamente do acionamento da bomba de resina de catalisador. Então os fluidos são escoados pela linha até o ponto de injeção.

Figura 48 - Desenho Esquemático da Bomba Escrava.

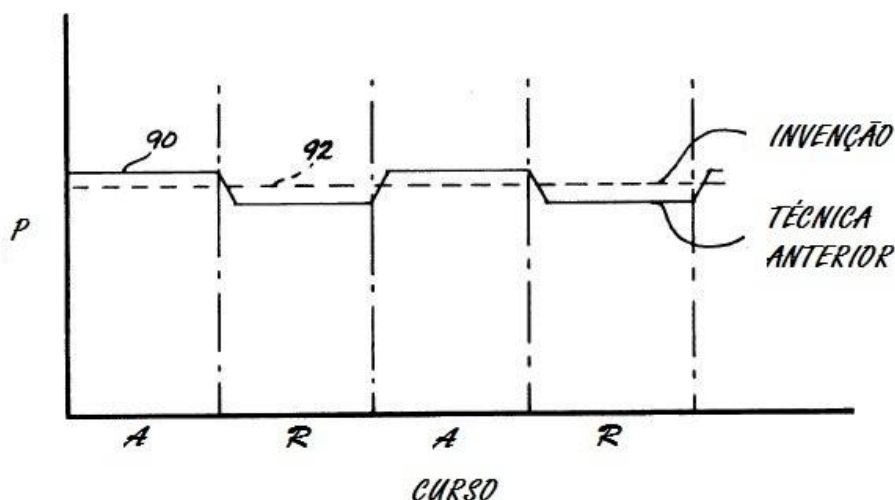


Fonte: Ives (1991).

O principal objetivo da representada invenção é fornecer uma pressão constante de resina e de catalisador ao ponto final da linha. Por se tratar de uma bomba de dupla ação, há o deslocamento de fluido para a linha, tanto na ação de avanço do pistão quanto no seu retorno, mas só isso não é o suficiente para gerar uma pressão constante no final da linha. A grande ideia da invenção é colocar acumuladores após as bombas de resina e de catalisador para que os dois fluidos, sejam entregues ao final da linha com uma pressão igual e constante.

Como podemos perceber no gráfico apresentado na Figura 48 que compara a técnica anterior com a da invenção.

Figura 49 - Gráfico da pressão de injeção x Curso.



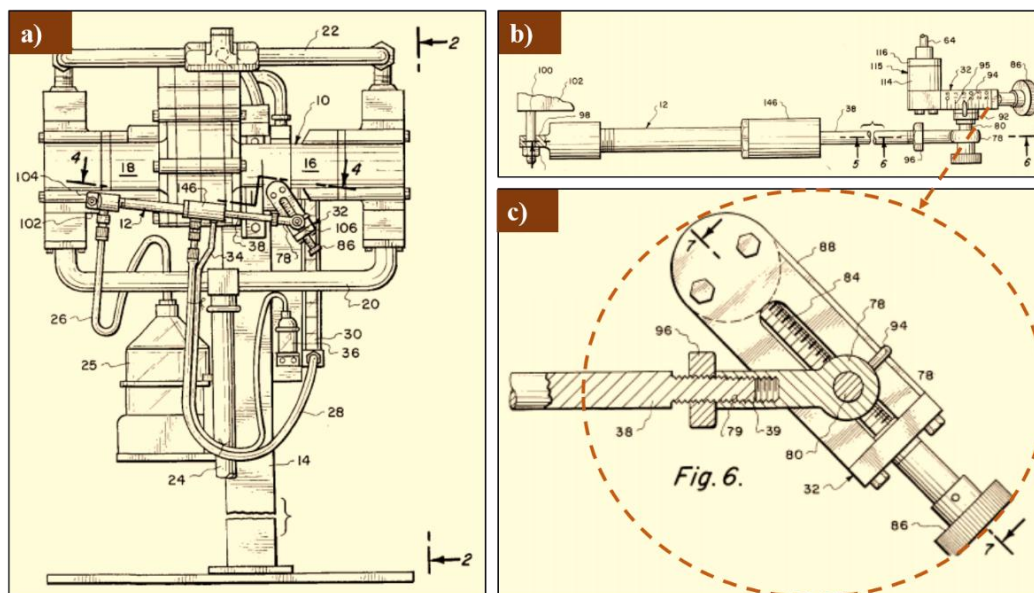
Fonte: Ives, (1991).

5.1.6.2. Sistema de Bombeamento de Múltiplos Fluidos com Medição Precisa: Patente Nº US 006015268 A

A aludida patente trata de uma unidade de medição precisa e um sistema de bombeamento de múltiplos fluidos simultâneos, composto por uma bomba principal para o fluido primário e uma auxiliar para o bombeamento do fluido secundário, que, de forma ajustável, trabalha em conjunto com a bomba principal. A bomba auxiliar é ligada à bomba principal através de um sistema de cremalheira e pinhão ligado a um braço oscilante que opera a bomba auxiliar simultaneamente com a bomba principal. A auxiliar pode ser infinitamente ajustável ao longo do intervalo selecionado uma vez que, através do sem fim, o ponto de ligação da mesma e a principal pode ser variado.

Observe na Figura 50:

Figura 50 - Sistema de Bombeamento de Múltiplos Fluidos com Medição Precisa: a) Vista Frontal da Concepção, b) Vista Lateral, c) Detalhe do sistema de ajuste.

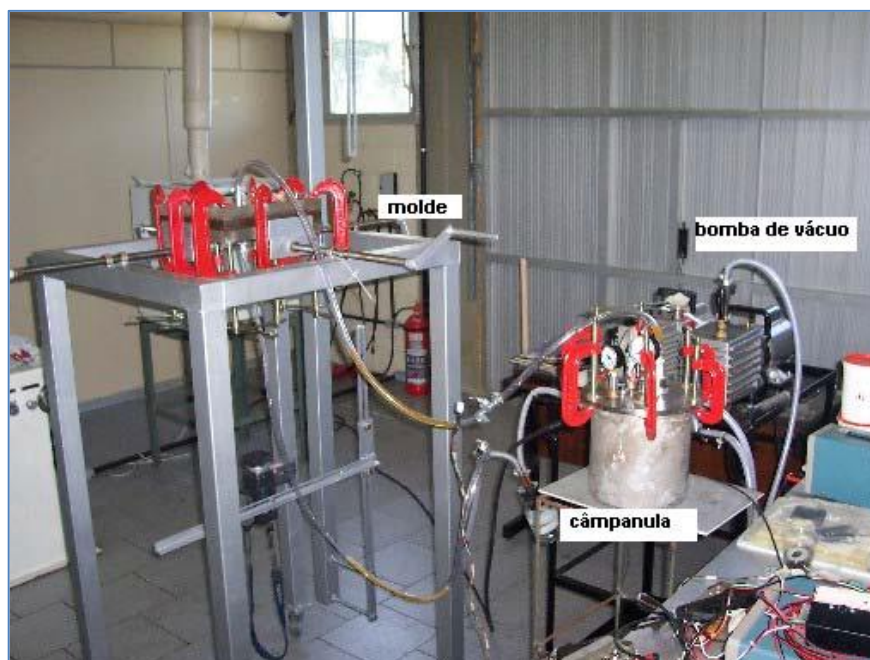


Fonte: Hetherington, (2000).

5.1.6.3. *Processamento de Placa Espessa de Compósito Através de Moldagem por Transferência de Resina*

Em Amorim (2007) foi desenvolvida a capacitação em processamento por RTM de compósitos espessos reforçados por fibras para fins estruturais e balísticos. Para tanto, foi projetado, desenvolvido e fabricado um equipamento de RTM (Figura 51) de concepção própria para a fabricação de placas compósitas espessas com 32 camadas de fibra de vidro (aproximadamente 25,4 mm) constituídas por tecidos de elevada gramatura e uma resina com uma viscosidade (350 cp), relativamente alta para RTM.

Figura 51 - Equipamento e Estação de Processamento por RTM.



Fonte: Amorim, (2007)

O equipamento desenvolvido conta com uma câmpula e uma bomba de vácuo para gerar o gradiente de pressão necessário para o escoamento da resina até um molde com várias entradas e saídas (Figura 52), possibilitando várias configurações de injeção e também com sensor de pressão de injeção e sistema para aquisição dos dados (Figura 51). Além disso, toda a estrutura de suporte do molde foi concebida em aço para a perfeita fixação do mesmo, esta permitia ainda, a fixação de duas câmeras que filmavam a frente de escoamento na parte de cima e na parte de baixo do molde (ponto de injeção) possibilitando o estudo do preenchimento do molde, bem como da permeabilidade da pré-forma fibrosa.

Figura 52 - Sistema de Instrumentação Adotado no Processamento.



Fonte: Amorim, (2007).

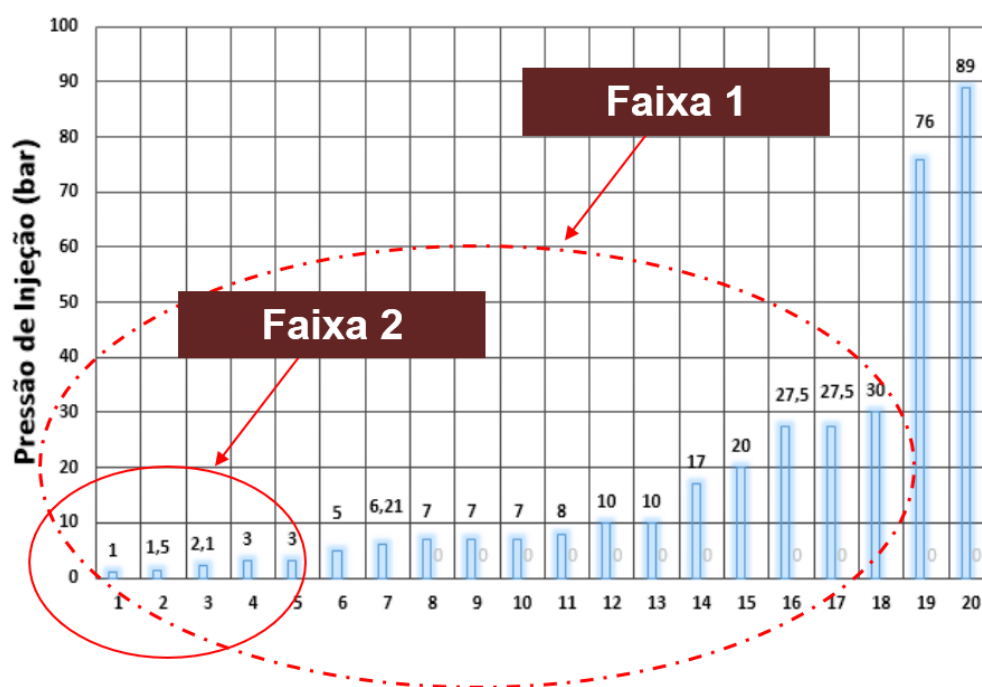
As pressões de injeção e de vácuo, quando do teste do equipamento eram da ordem de 1,4bar e 300mbar respectivamente. O equipamento desenvolvido se mostrou eficaz na produção de placas espessas de compósitos com 28, 30 e 32 camadas de fibra.

5.1.7. Levantamento da Pressão de Injeção em Equipamentos de Injeção de Resina via RTM

Como não há um parâmetro inicial para o desenvolvimento de um equipamento de injeção de resina, optou-se por um parâmetro base a pressão de injeção, por se tratar de uma propriedade que rege, junto com a vazão volumétrica o processamento mais básico, sendo a primeira mais importante no caráter do projeto do equipamento pelo fato do dimensionamento do sistema de acionamento e dos esforços nos componentes serem desenvolvidos de acordo com esta.

Desta feita, optou-se pela pesquisa de equipamentos de mercado e em artigos, dissertações e teses para um melhor entendimento das capacidades dos equipamentos e necessidades de processo, assim a seguinte distribuição de pressões foi obtida (Figura 53) onde no eixo das abcissas estão as fontes de pesquisa e no eixo das ordenadas a máxima pressão de injeção respectiva. As referências podem ser consultadas na referência bibliográfica deste trabalho.

Figura 53 - Gráfico da Pressão de Injeção dos Equipamentos e Processamentos de Injeção de Resina por RTM.



Fonte: Autoria Própria.

Inicialmente a tentativa foi de utilizar uma faixa de pressões que pudesse abranger a maioria dos equipamentos, desta forma, optou-se por uma faixa de pressão de injeção compreendendo valores de 1 a 30bar. Iniciando o projeto preliminar do equipamento, notou-se que os custos e requisitos técnicos iriam inviabilizar o projeto, pois tratava-se de um equipamento de uso laboratorial e de baixo custo de produção. Assim, optou-se por uma faixa de pressão que compreende 25% das fontes pesquisadas, ou seja, até 3bar de pressão de injeção (Maiores detalhes na seção 5.2).

5.2. PROJETO CONCEITUAL DO EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO DE RESINA VIA RTM

Após a finalização do projeto informacional, iniciou-se o desenvolvimento de um conceito para o equipamento. Inicialmente, foram coletados diversos tipos de dados, tais como: patentes, dissertações, teses, artigos, livros, vídeos e catálogos de fabricantes de equipamentos e feita uma análise pormenorizada dos conjuntos.

Os conjuntos apresentados como subsistemas foram definidos para facilitar o estudo do equipamento, bem como o seu desenvolvimento. Para todos estes, uma dificuldade em comum encontrada foi a falta de detalhamento em todas as fontes do projeto desse tipo de equipamento, desta feita, os subsistemas são apresentados como se segue:


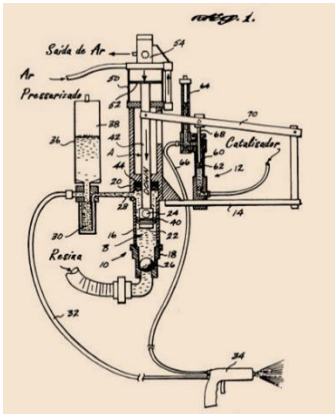
1. Subsistema bomba de solução fluida;
2. Subsistema estrutural do equipamento;
3. Subsistema de acionamento;
4. Subsistema Misturador;
5. Subsistema de descarga;
6. Subsistema de transporte bomba-molde;
7. Subsistema de controle e aquisição.

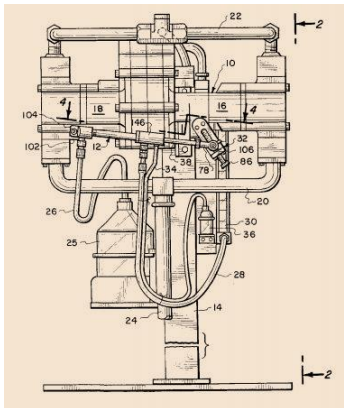
5.2.1. Subsistema Bomba de Solução Fluida

O subsistema bomba de solução fluida é o coração do equipamento, pois é através desta que é gerada a potência necessária para deslocar o fluido através dos condutos até o molde e possibilitar o preenchimento do mesmo.

As concepções consideradas no projeto informacional da pesquisa, para este subsistema estão dispostas no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema Bomba de Solução Fluida.

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Radius® 2100cc Pneumatic RTM Injection System		BS1 – Bomba de deslocamento positivo de simples ação;
Patente Nº EP 0451942 A1		BS2 - Bomba de Deslocamento Positivo de Dupla Ação;

<p>Patente Nº US 006015268 A</p>		<p>BS3 - Sistema de bombeamento de múltiplos fluidos com calibração precisa;</p>
---	--	---

Fonte: Autoria Própria.

O princípio de solução adotado em BS1 é o de uma bomba de simples ação com deslocamento positivo, onde um pistão pneumático é acoplado à uma camisa na qual o êmbolo desliza, empreendendo uma pressão ao fluido, gerando o escoamento da resina pela tubulação acoplada na saída da bomba. Suas vantagens são: bombeamento por uma única ação impossibilitando a queda de pressão e/ou vazão intrínseco em um bombeamento com mais de uma ação e o simples acesso à parte interna da bomba para uma fácil manutenção e limpeza. Como desvantagens, esse tipo de sistema não permite injeções de grandes volumes de resinas ou de misturas fluidas e a limpeza deve ser realizada rapidamente, quando da injeção de misturas para não haver cura dentro da bomba.

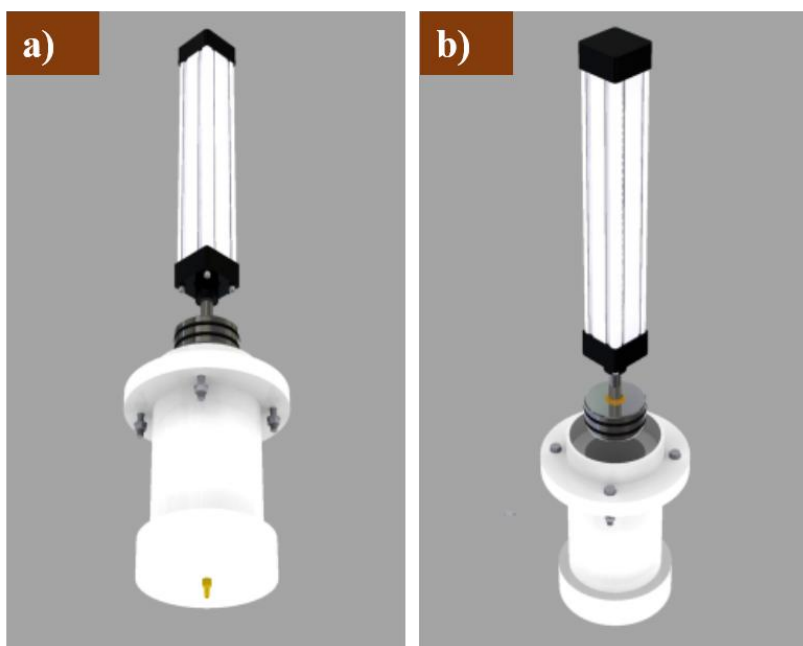
Em BS2, apresenta-se uma bomba de deslocamento positivo de dupla ação, a qual a bomba principal é a de resina e a bomba dita “escrava” é de catalisador, é acionada por meio de uma haste conectada ao pistão de acionamento da bomba principal. As bombas são feitas de aço inoxidável. Apresenta como vantagens: a mistura é feita fora das bombas em outro sistema, conhecido como misturador e por meio dos acumuladores depois das respectivas bombas, há uma injeção contínua de grandes volumes de fluido. Como desvantagem para esta concepção temos o fato da mesma ser de difícil desenvolvimento, requerendo um trabalho maior de pesquisa e desenvolvimento, bem como um maior custo e processos de fabricação mais elaborados,

por precisar de usinagem de precisão. A sua limpeza é mais difícil, comparando-a com os outros princípios de solução abordados nesta pesquisa, bem como sua manutenção.

Para BS3 apresenta-se uma bomba acionada por motor elétrico, que, por meio de engrenagens e mecanismos acionam pistões que injetam dois tipos de fluidos diferentes, com um sistema que, por meio de fusos, fazem o ajuste da mistura. Tem a vantagem de ser mais preciso no ajuste da mistura do que BS2 e fornecer, como a última concepção, uma injeção contínua de grandes volumes de fluido. Como desvantagem tem-se o custo e o fato deste conceito ser, sofisticado para ser desenvolvido em uma pesquisa acadêmica.

A concepção escolhida foi a bomba de deslocamento positivo de simples ação (BS1). A Figura 54 representa um esboço da concepção escolhida:

Figura 54 - Esboço da Concepção Escolhida para a Bomba: a) Vista Ortogonal 1. b) Vista Ortogonal 2.





Fonte: Autoria Própria.

5.2.2. Subsistema Estrutural do Equipamento

O subsistema estrutural funciona para o equipamento como um esqueleto funciona para o corpo humano, com a função de sustentação, além de todos os outros subsistemas serem nele acoplados. Deve suportar as cargas impostas em trabalho, além de ser rígido o suficiente para não proporcionar vibrações excessivas para a máquina.

Com o projeto informacional, foi possível o estudo de diversas configurações para este sistema e as que mais se destacaram, dentre os vários aspectos, estão dispostas na Quadro 2.

Quadro 2 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema Estrutural.

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Magnum Venus Plastech™ Innovator Pro	 A photograph of the Magnum Venus Plastech Innovator Pro equipment. It is a complex machine with a blue and black frame, a control panel with various buttons and a digital display, and a large white plastic bottle connected to the system. It is mounted on a wheeled base.	E1 – Estrutura tipo carrinho transportador;
GlasCraft® Spartan III	 A photograph of the GlasCraft® Spartan III equipment. It features a red and yellow frame with a control panel and a large white plastic bottle. The machine is mounted on a red base with wheels. A black hose and some tools are visible in the foreground.	E2 – Estrutura tipo torre fixa;

Pistão de Injeção da ISOJET® Equipements		E3 – Estrutura tipo torre basculante;
Concepção Própria		E4 – Estrutura tipo mesa.

Fonte: Autoria Própria.

O princípio de solução adotado em E1, tipo carrinho transportador em tubos de aço carbono tem a vantagem de permitir a mobilidade do equipamento pelo ambiente de trabalho, mas apresenta como desvantagens a baixa capacidade de carga sem que o operador tenha dificuldades no transporte do equipamento, das partes móveis expostas.

O princípio adotado por E2 é uma estrutura tipo torre, onde os outros subsistemas são dispostos nesta. Tem como vantagem a proteção do operador, pelas partes móveis não ficarem a mostra e a possibilidade de se transportar o equipamento pelo ambiente de trabalho. Como desvantagem apresenta uma certa dificuldade no transporte, visto que não há uma estrutura que auxilie na pega do equipamento, tornando-lhe menos ergonômico neste aspecto.

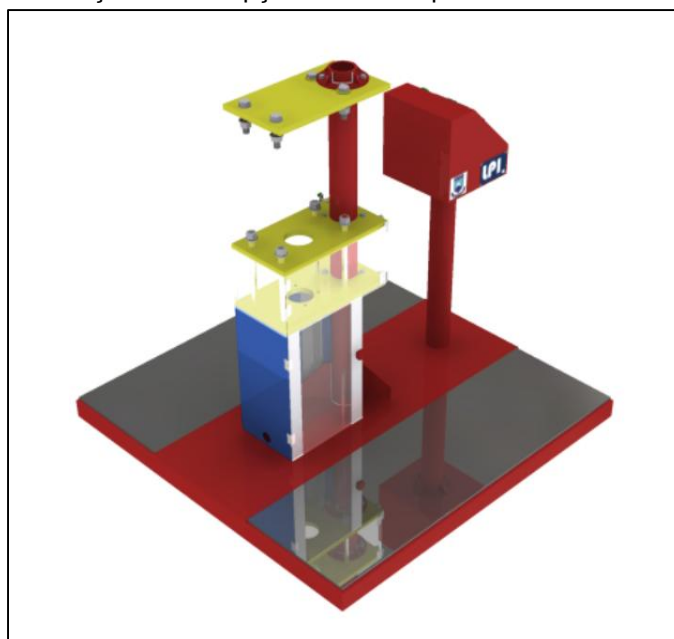
Em E3 o princípio de solução é uma estrutura tipo torre basculante, no entanto este subsistema tem como vantagens, além proporcionadas pela estrutura tipo torre fixa, a possibilidade de angular a bomba, permitindo nela a inserção da mistura fluida, bem como uma melhor possibilidade de manutenção, no que tange à limpeza e troca de

componentes, quando das suas falhas. Como desvantagem, o fato de ser um sistema mais complexo para o escopo deste trabalho, além de apresentar a desvantagem verificada em E2.

O princípio de solução E4 é uma estrutura tipo mesa, possui como vantagem seu formato consolidado, de fácil fabricação em aço carbono e baixo custo, além de possibilitar a sua simples movimentação pelo ambiente de trabalho. Como desvantagens, não propicia uma proteção contra partes móveis ao operador.

A concepção contemplada foi a estrutura tipo torre fixa (E2), representada na Figura 55 através de seu esboço.

Figura 55 - Esboço da Concepção Escolhida para o Subsistema Estrutural.



Fonte: Autoria Própria.

A escolha de tal concepção se deu pelo fato desta ser de acessível fabricação, pela sua confiabilidade e por critérios de segurança quanto à sua operação. O material utilizado para sua fabricação são chapas e placas de aço e perfis de seção quadrada (Metalon).

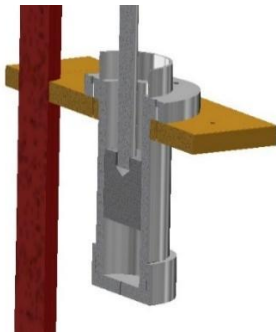
5.2.3. Subsistema Acionamento

O presente subsistema trata do tipo de acionamento utilizado para empreender o trabalho necessário ao deslocamento do fluido, devendo ser de simples concepção e conseguir iniciar e cessar a força imposta ao avanço do pistão com o acionamento de um botão.

As seguintes concepções foram abordadas nesse estudo (Quadro 3):

Quadro 3 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema Acionamento.

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Radius® 2100 cc Pneumática		A1 – Acionamento pneumático;
Pistão de Injeção da ISOJET® Equipements, Radius® 2100 cc elétrica		A2 – Acionamento elétrico;

<p>Concepção Própria</p>		<p>A3 – Acionamento hidráulico.</p>
---------------------------------	---	--

Fonte: Autoria própria.

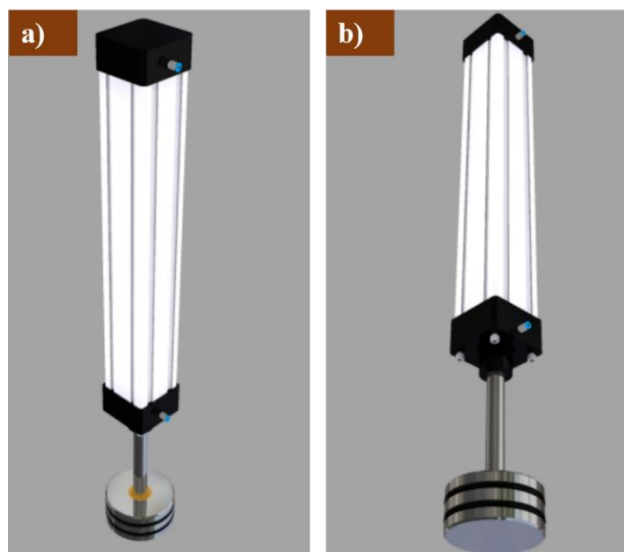
No princípio de solução A1, tem-se a utilização de energia pneumática para impulsionar a bomba. Desta feita, um cilindro pneumático, ligado em um compressor, é acoplado a um êmbolo e, ao ser conectado a camisa (reservatório de fluido) da bomba, forma o conjunto da bomba de solução fluida. Como vantagem da utilização deste tipo de solução, temos um menor custo, em detrimento às outras duas concepções, para todo o circuito de acionamento. Como desvantagens, temos o fato do ar ser um fluido compressível, desta feita, não se tem uma pressão de injeção constante, sem flutuações. Além desse fato, o controle do avanço se torna mais difícil, principalmente para velocidades mais baixas.

Em A2 consta o acionamento do pistão por motor elétrico, então isto se dá através de um mecanismo de engrenagem e haste com rosca sem fim. A seu favor, esta concepção tem o fato do controle de pressão ser mais fino do que em A1 e A3 e como desvantagem, está o fato da concepção ser de valor elevado, saindo do escopo dos custos disponíveis.

A3 é um princípio de solução voltado ao acionamento por meio da força hidráulica, esta é gerada em uma unidade apropriada, transmitida por tubulações e controlada por válvulas em um circuito hidráulico. Apresenta como vantagens o fornecimento de uma pressão de injeção e vazão mássica constantes. Em detrimento, este princípio é oneroso e, por haver a necessidade de transporte do equipamento até o molde, ele se torna inviável para o conceito programado, tendo em vista que a unidade hidráulica possui um peso considerável e seriam necessários outros mecanismos para o seu transporte.

Desta feita, a opção contemplada por seu custo benefício, possibilitando o desenvolvimento do projeto foi a A1 representada pela Figura 56:

Figura 56 - Esboço da Concepção Escolhida para o Subsistema Acionamento: a) Vista Ortogonal 1 e b) Vista Ortogonal 2.



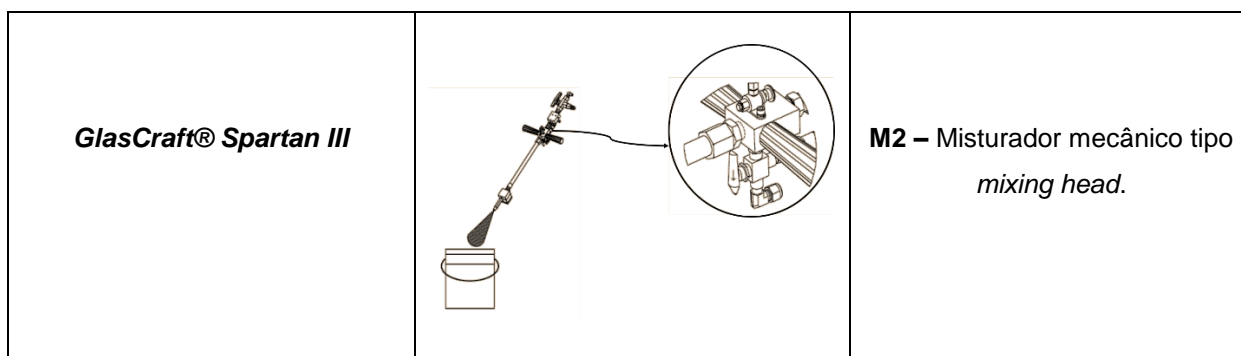
Fonte: Autoria Própria.

5.2.4. Subsistema Misturador

Se refere ao subsistema de mistura da proporção de resina e catalisador, formando a solução fluida desejada. Os conceitos observados estão dispostos no Quadro 4:

Quadro 4 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema Misturador.

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Universidade Federal do Rio de Janeiro (Amorim, 2007)		M1 – Misturador Manual;



Fonte: Autoria Própria.

O subsistema de mistura (M1) descrito por Amorim (2011) são dois recipientes, contendo, em um catalisador e em outro resina, previamente pesadas, em suas corretas proporções são misturados em um terceiro recipiente com o auxílio de uma vareta por um determinado tempo, para garantir a homogeneidade da mistura e, depois disso, são levados ao equipamento onde a injeção ocorre. Como vantagem, apresenta-se o fato de ter baixo custo e de requerer instrumentos facilmente encontrados no mercado. Dois outros equipamentos utilizam este mesmo princípio: a *Radius® 2100 cc* Pneumática e o pistão de injeção *Isojet®*.

O subsistema de mistura (M2), do equipamento *Spartan® 3* é similar para vários outros equipamentos que trabalham com a bomba de deslocamento positivo de dupla ação. Os componentes são misturados próximos ao bico injetor, por um componente denominado “*mixing head*” que em tradução livre é cabeça misturadora. É nesse ponto onde os dois fluidos se encontram (resina e catalisador) e as proporções injetadas pelas respectivas bombas são então misturadas. Seu ponto forte ocorre em misturar a uma velocidade constante, propiciando uma mistura mais homogênea e com uma formação menor de bolhas, se comparado com o processo manual. Além disso, a mistura não é feita no ambiente, melhorando a qualidade do ar no setor de processamento.

Por ser de menor custo e por propiciar uma mistura adequada ao tipo de bomba adotado na presente pesquisa descrita, optou-se pela mistura manual (M1) (Figura 57).

Figura 57 - Concepção Escolhida para o Subsistema Misturador.



Fonte: www.streetcustoms.com.br, (2014).

5.2.5. Subsistema de Descarga

Este subsistema tem por objetivo limpar a bomba e os condutos depois da injeção para impedir o endurecimento da mistura fluida na bomba ou nos condutos, evitando assim, a degradação de componentes do equipamento e até mesmo da bomba, o que poderia levar à uma perda substancial de tempo e dinheiro.

No Quadro 5 estão demonstradas as configurações que mais se de destaque:

Quadro 5 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema de Descarga.

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Magnum Venus Plastech™ Innovator Pro		D1 – Limpeza automática com ciclo de descarga;
Pistão de Injeção da ISOJET® Equipements		D2 – Limpeza Manual.
Concepção Própria		D3 – Limpeza semiautomática com ciclos de descarga.

Fonte: Autoria Própria.

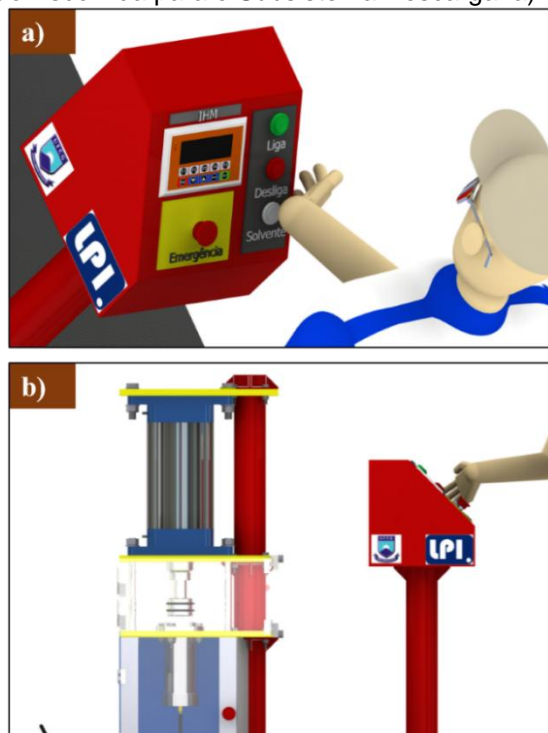
O princípio de solução da *Magnum Venus Plastech™ Innovator Pro* (D1) conta com uma bomba para o solvente que é acionada após o ciclo de injeção, conforme *setup* prévio feito pelo operador ou por um botão de descarga localizado no painel de instrumentos. Por ser automatizado, o mesmo conta com vantagem, pois se houver o esquecimento, pelo operador, desta atividade, a mesma é executada. Além disso, existe um recipiente fechado para armazenar o descarte, tornando o ambiente de trabalho mais limpo e organizado. Este, em detrimento aos outros dois conceitos, é mais oneroso e de concepção mais elaborada.

D2 é o princípio apresentado pela *Isojet®*, o qual realizada uma simples limpeza nos anéis de vedação do êmbolo e o descarte dos condutos que levam a resina até o molde. Tem vantagem de ser simples, se comparado à D1, mas perde em eficiência, por não possibilitar o aproveitamento dos condutos.

D3 é um princípio de solução proposto pelo autor, onde, após o ciclo de injeção, a bomba é preenchida com uma solução de 40% de *tinner* e 60% de água e são realizados ciclos de descarga em um recipiente aberto. Igualmente ao D2, é simples, mas utiliza o próprio pistão de injeção para realizar a descarga. Além disso, permite que todos os condutos sejam limpos, tornando-o mais eficiente do que D2.

Pelas características mencionadas, a concepção escolhida foi D3 (Figura 58):

Figura 58 - Concepção Escolhida para o Subsistema Descarga: a) Botoeira e b) Bomba.



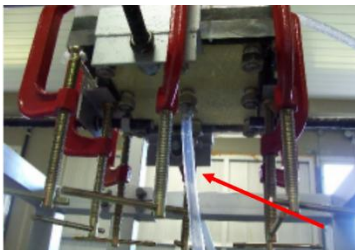

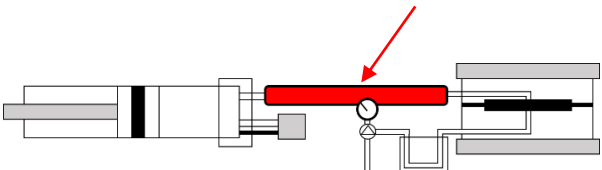
Fonte: Autoria Própria.

5.2.6. Subsistema Transporte Bomba-Molde

O subsistema de transporte bomba-molde tem por função conduzir a mistura da bomba até o molde, de forma a minimizar as perdas ao máximo.

Os conceitos observados estão dispostos no Quadro 6:

Quadro 6 - Comparativo entre as Soluções para o Subsistema de Transporte Bomba-Molde.

Equipamento	Imagem	Princípio de Solução
Universidade Federal do Rio de Janeiro (Amorim, 2007)		TBM1 – Tubulação simples com bico injetor;
GlasCraft® Spartan III		TBM2 – Tubulação com pistola de injeção;
NASA Langely Research Center (Jim M. e John W., 1998)		TBM3 – Tubulação aquecida com pistola de injeção.

Fonte: Autoria Própria.

No princípio de solução TBM1, Amorim (2011) faz uso de uma mangueira comercial com calibre de 1/2” como tubulação, além de conexões e bicos injetores desenvolvidos no próprio projeto de tese do autor. Ainda, se utiliza de um sensor de pressão para avaliar a pressão de injeção e estrangulamento externo para abertura e

fechamento do fluxo. Tem por pontos fortes, sua grande disponibilidade no comércio e seu baixo custo no que tange a mangueira e a fácil fabricação das conexões e bicos.

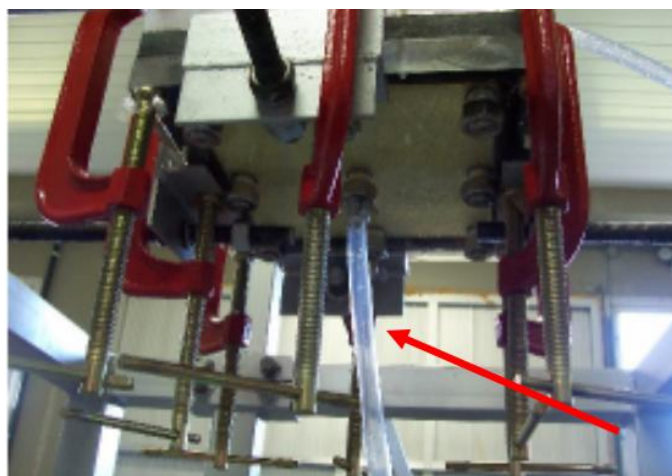
No equipamento da *GlasCraft®* (TBM2), o sistema projetado conta, além da tubulação e conexões, com um aparato chamado de pistola de injeção, comum nos equipamentos que utilizam bomba de deslocamento positivo de dupla ação, que é que uma série de válvulas (de controle, de recirculação de resina e catalizador), sensores para aferição da pressão de injeção e cabeça misturadora. Tem por vantagem levar a resina com precisão ao molde, bem como equipamentos para auxiliar no controle dos parâmetros de injeção. Por seu grau de complexidade de projeto e alto custo o mesmo não atendeu aos requisitos da pesquisa em pauta.

TBM3 foi o princípio de solução adotado por Jim M. e John W. (1998) que conta com uma linha de transporte aquecida. Utiliza-se de materiais especiais na tubulação, para suportar a temperatura que pode chegar a níveis de 288°C, além de material isolante, para manter a temperatura e evitar acidentes de trabalho, entretanto a sua principal desvantagem é no que tange ao custo. O conceito discutido foi descartado, pela adição de temperatura no processo teste não ser necessária.

Desta feita, TBM1 foi escolhido dentre os outros princípios de solução, por ser mais simples e não obstante, atender com eficácia as demandas do projeto.

Esta concepção pode ser observada na figura 59:

Figura 59 - Concepção Escolhida para o Subsistema Transporte Bomba-Molde.



Fonte: Amorim, 2007.

5.2.7. Subsistema de Controle e Aquisição

Para cada propriedade que se desejou obter (vazão volumétrica, velocidade de avanço, pressão de injeção) foi desenvolvido um método de ajuste e aquisição próprios. Para efeitos metodológicos este sistema terá a sigla CA1.

5.2.8. Concepções

5.2.8.1. Concepção 01

No Quadro 7 apresenta-se a matriz morfológica do projeto conceitual do equipamento de injeção de resina por RTM estudado, onde destacam-se os subsistemas deste e os princípios de solução esmiuçados anteriormente para o atendimento das necessidades iniciais.

Quadro 7 - Matriz Morfológica do Projeto Conceitual.

EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO POR RTM	SUBSISTEMA	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO (P.S.)			
		P.S.1	P.S.2	P.S.3	P.S.4
	Bomba de solução fluida	BS1	BS2	BS3	-
	Estrutural do equipamento	E1	E2	E3	E4
	Acionamento	A1	A2	A3	-
	Misturador	M1	M2	-	-
	Descarga	D1	D2	D3	-
	Transporte bomba-molde	TBM1	TBM2	TBM3	-
	Controle e aquisição	CA1	-	-	-

Fonte: Autoria Própria

A matriz (Quadro 7) dispõe várias soluções, permitindo várias configurações para o projeto do equipamento.

A concepção 01 do equipamento tem a seguinte configuração, destacada na matriz morfológica com os subsistemas selecionados (Quadro 8).

Quadro 8 - Matriz Morfológica do Projeto Conceitual com os Subsistemas Selecionados.

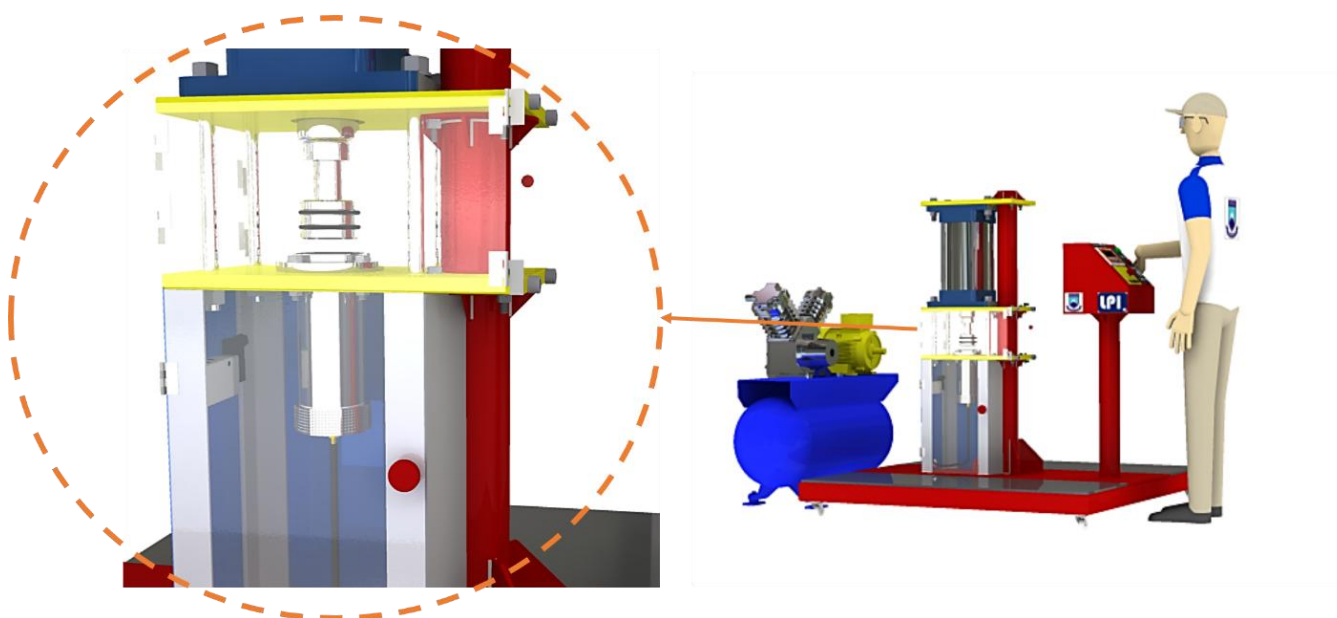
EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO POR RTM	SUBSISTEMA	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO (P.S.)			
		P.S.1	P.S.2	P.S.3	P.S.4
	Bomba de solução fluida	BS1	BS2	BS3	-
	Estrutural do equipamento	E1	E2	E3	E4
	Acionamento	A1	A2	A3	-
	Misturador	M1	M2	-	-
	Descarga	D1	D2	D3	-
	Transporte bomba-molde	TBM1	TBM2	TBM3	-
	Controle e aquisição	CA1	-	-	-

Fonte: Autoria Própria

Dado o estudo e a seleção dos princípios de solução que melhor atendiam as necessidades iniciais impostas pela pesquisa, a concepção escolhida foi a disposta também na forma de matriz no Quadro 8.

Um esboço, concebido no ambiente CAD pelo *software Autodesk Inventor® 2013* versão de estudante, de todos os seus subsistemas pode ser observado na Figura 60:

Figura 60 - Esboço da Concepção do Equipamento de Injeção.



Fonte: Autoria Própria.

O primeiro conceito desenvolvido tem por finalidade atender ao mercado consumidor de equipamentos de RTM e foi desenvolvido para tal finalidade. Todo o seu *design* foi orientado para propiciar a melhor interação homem máquina, resguardando a segurança do operador. Além disso, este conceito foi elaborado para atingir 85% das faixas de pressão dos equipamentos e processamentos de injeção de resina por RTM pesquisados.

O mesmo conta com as seguintes características dispostas na Tabela 10:

Tabela 10 - Características da Concepção 01.

Concepção 01		
Características	Unidade	Valores
Faixa de pressão	bar	1 – 27,5
Componentes estruturais (*)	u.m.	23
Massa Total Calculada pelo software	kg	504,92

(*) Neste trabalho são considerados componentes estruturais todos os elementos de reforço exceto porcas, parafusos e arruelas.

Fonte: Autoria Própria.

5.2.8.2. Concepção 02

A concepção 02 tem a seguinte configuração apresentada na matriz morfológica abaixo (Quadro 9).

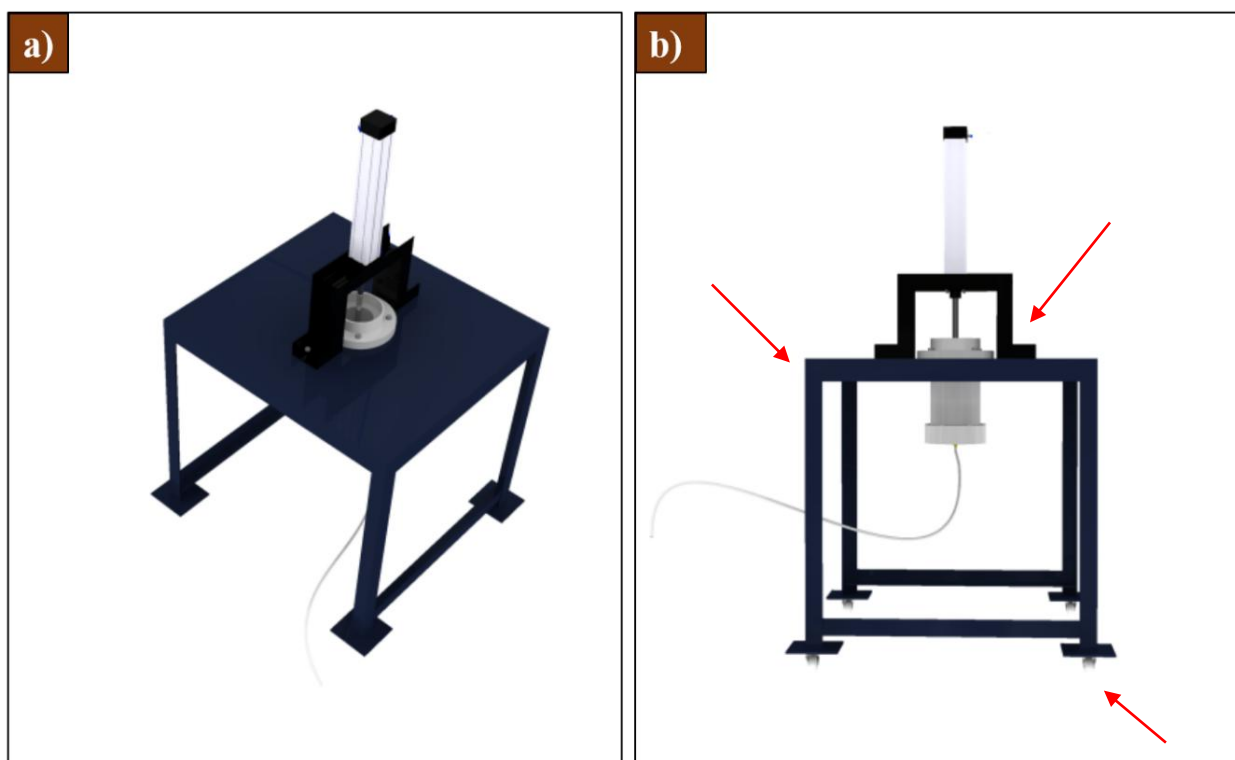
Quadro 9 - Matriz Morfológica do Projeto Conceitual com os Subsistemas Selecionados

EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO POR RTM	SUBSISTEMA	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO (P.S.)			
		P.S.1	P.S.2	P.S.3	P.S.4
	Bomba de solução fluida	BS1	BS2	BS3	-
	Estrutural do equipamento	E1	E2	E3	E4
	Acionamento	A1	A2	A3	-
	Misturador	M1	M2	-	-
	Descarga	D1	D2	D3	-
	Transporte bomba-molde	TBM1	TBM2	TBM3	-
	Controle e aquisição	CA1	-	-	-

Fonte: Autoria Própria.

Um segundo esboço, também concebido no ambiente CAD pelo *software Autodesk Inventor® 2013* versão de estudante para a nova concepção adotada e aprovada, a qual pode ser observada na Figura 61.

Figura 61 - Esboço da Concepção Aprovada do Equipamento de Injeção: a) Vista 1, b) Vista 2.



Fonte: Autoria Própria.

O segundo conceito desenvolvido tem cunho laboratorial, apresenta soluções mais simples para a estrutura. Esta concepção inovadora, demandou um trabalho intelectual de 2 meses. A estrutura da bomba de solução fluida é suportada por 4 rodízios, uma mesa e uma peça em “U”, cujo desenvolvimento propiciou a redução de vários componentes, bem como uma redução substancial nos custos do projeto. Esta concepção destina-se a 25% das faixas de pressão dos equipamentos e processamentos de injeção de resina por RTM pesquisados.

Suas características são apresentadas na Tabela 11 que segue:

Tabela 11 - Características da Concepção 02.

Concepção 02		
Características	Unidade	Valores
Faixa de pressão	bar	1 – 3
Componentes estruturais (*)	u.m.	6
Massa Total Calculada pelo software	kg	62,67

Fonte: Autoria Própria.

A segunda concepção se mostrou mais adequada e eficiente para os objetivos do trabalho em pauta. Com a grande redução de peso (87,59%), dos seus componentes estruturais (73,91%) e da faixa de pressão há então uma redução geral de custos. A concepção 02 é adequada ao escopo do projeto, desta feita esta foi aprovada.

5.3. PROJETO PRELIMINAR

Após a definição do conceito se iniciou a seleção de dispositivos, dos materiais e dimensionamento deles.

5.3.1. Subsistema de Acionamento

Para o desenvolvimento do circuito pneumático foram observadas algumas necessidades, destacadas para que houvesse a possibilidade de acionamento do cilindro no avanço, parada e acionamento do retorno. Alguns testes foram desenvolvidos, em laboratório de máquinas hidráulicas e pneumáticas do departamento de Engenharia Mecânica da UFCG e chegou-se a concepção do circuito (disposta no ANEXO E). A mesma conta com uma unidade compressora, uma unidade de tratamento de ar,

necessária para compressores de pistão, uma válvula de 5/2 vias com duplo piloto, uma válvula de 4/3 vias e um pistão de dupla ação.

Para o dimensionamento do pistão foi considerada a faixa de 25% das fontes pesquisadas que é de 0 à 3bar. Dentro desta ótica, o cilindro escolhido conforme o catálogo de cilindros ISO 6431 da *BelAir®* apresenta as seguintes características principais dispostas na Tabela 12.

Tabela 12 - Características do Cilindro Selecionado.

Diâmetro do cilindro (mm)	Diâmetro da haste (mm)	Área efetiva (mm ²)		Força teórica a 6kgf/cm ² (N)	
		Avanço	Retorno	Avanço	Retorno
63	20	31220	2800	1833,84	1649,48

Fonte: Catálogo Belair®, (2010).

Então, para um êmbolo com o diâmetro $\varphi = 4$ in, teremos que a pressão máxima ($P_{m\acute{a}x}$) exercida pelo conjunto pode ser obtida pela equação 3:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (3)$$

Onde, A é a área da seção transversal do êmbolo. Colocando os valores na equação, tem-se que:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1870,35}{0,00811} = 0,231MPa$$

Assim, tem-se que $P_{m\acute{a}x} = 2,31bar$. Sendo esta, de forma teórica, a maior pressão fornecida pelo pistão, dada a área do êmbolo.

5.3.2. Subsistema Bomba de Solução Fluida

Observou-se o material utilizado em bombas de alguns equipamentos disponíveis no mercado e em trabalhos acadêmicos e optou-se por utilizar o mesmo que Cavalcanti (2014) fez uso em sua pesquisa acadêmica: o *Nylon 06 da Nitanyl®* por ser de fácil usinagem e propiciar um acabamento liso as peças. Outra característica se apresenta quanto a retirada de resina, permitindo uma limpeza mais rápida e simples, além de ser resistente a solventes orgânicos. Um maior detalhamento quanto as suas propriedades, é apresentado no ANEXO F.

No esboço inicial do projeto da mesma, foram definidas, fazendo-se um levantamento prévio do mercado acerca dos materiais disponíveis para sua fabricação. Seu dimensionamento foi feito com base na NBR 6158 que trata dos sistemas de ajuste e tolerância, sendo seu ajuste com folga. Assim, foi definido um para o furo H8 e para o eixo f7 (H8/f7). Maiores detalhes estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Ajuste e tolerância da bomba.

H8/f7	Furo (mm)	Eixo (mm)
Tolerância	0,054	0,035
Afastamento fundamental	0	-0,036
Afastamento superior	0,054	-0,036
Afastamento inferior	0	-0,071
Dimensão máxima	101,654	101,564
Dimensão mínima	101,6	101,529
Ajuste	Folga	
Folga máxima	0,125	
Folga mínima	0,036	

Fonte: Autoria Própria.

5.3.2.1. Êmbolo

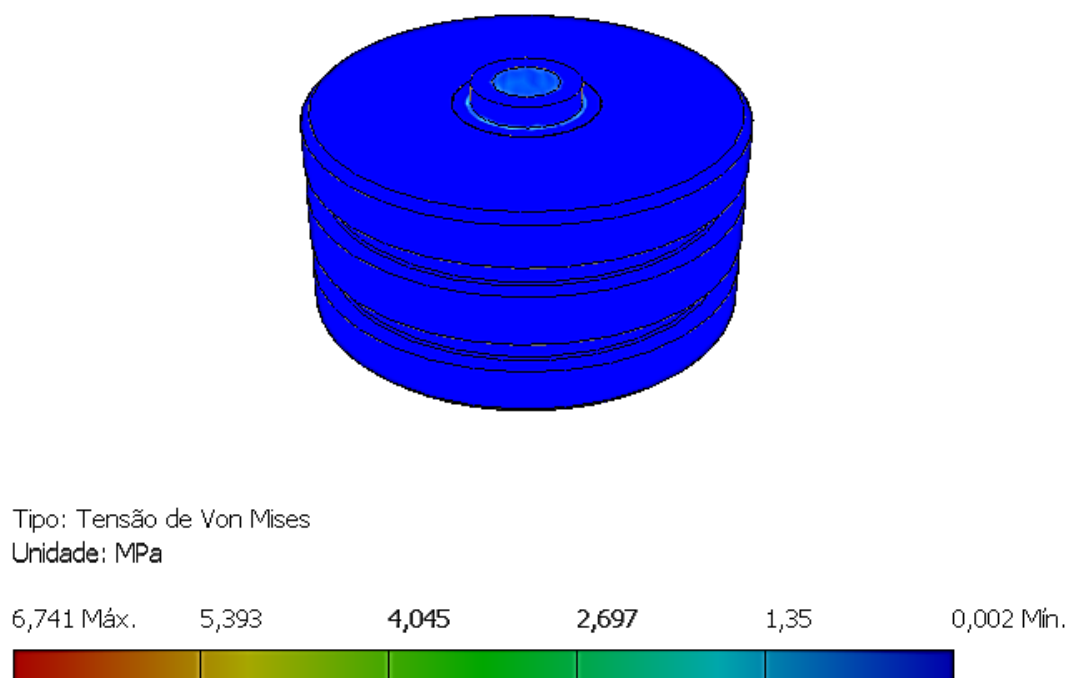
O material base escolhido para o êmbolo foi o aço inox, tendo em vista a maioria dos equipamentos pesquisados utilizarem componentes da bomba com tal material, por sua durabilidade, resistência a solventes orgânicos, resistência à corrosão, por conferir bons ajustes dimensionais entre outras características. Os dimensionamentos das vedações foram feitos com base no catálogo do fabricante *Trelleborg®*.

Para verificar a resistência ao esforço foi realizada a simulação do componente na condição mais crítica, que seria com o sistema entupido. Assim, para o êmbolo, tem-se as seguintes condições do problema:

- Fixa na rosca e nas paredes laterais;
- Carga $F = 1870,35$ N distribuída em toda face que ficará em contato com a resina;
- Foi considerado o peso do êmbolo e da bucha.

Os materiais utilizados foram: Aço inox A 304 com limite de escoamento (L_e) da ordem de 294 MPa e para o latão amarelo macio com L_e de 103,40 MPa. Na figura 61, destacam-se os resultados obtidos para tensão de *Von Mises* na simulação numérica realizada com o auxílio do *software Autodesk Inventor®* 2013 versão do estudante.

Figura 62 - Análise de Tensão do Êmbolo.



Fonte: Autoria Própria.

Percebe-se que o componente suportará as cargas impostas no trabalho com grande facilidade. Informações quanto ao deslocamento, coeficiente de segurança e gráfico de convergência da simulação estão dispostas no ANEXO G, não só para esta, mas para todas as simulações que seguiram no projeto preliminar.

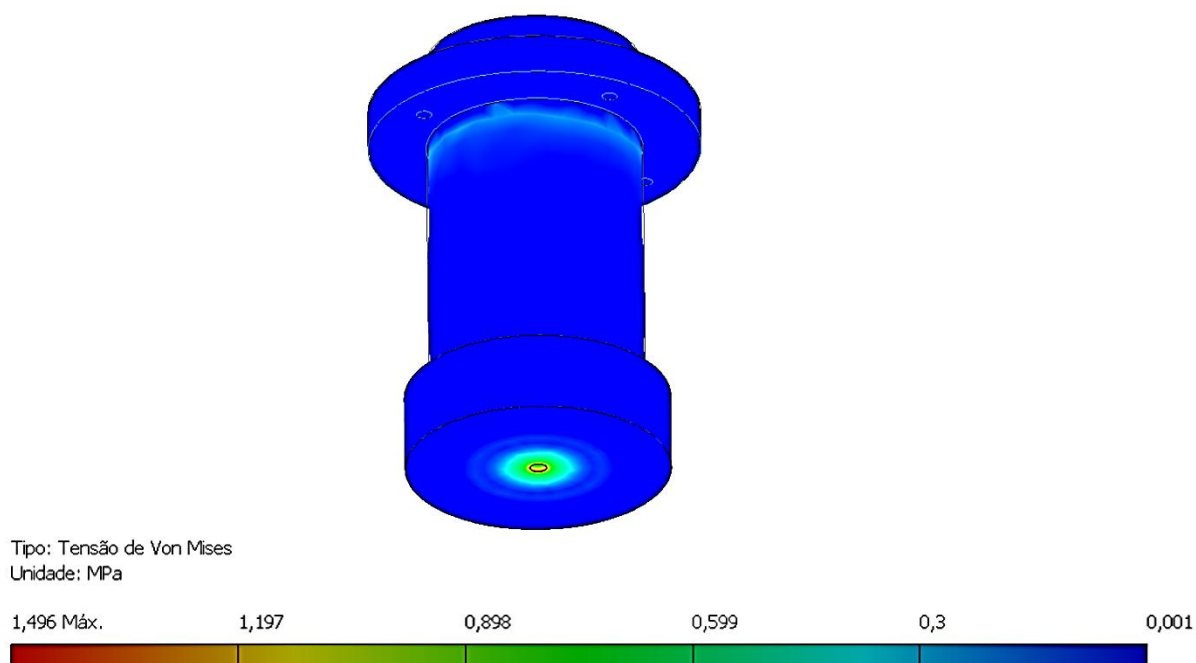
5.3.2.2. *Camisa e Tampa*

Como previamente foi estabelecido, o material escolhido para o corpo da bomba foi o *Nylon 6*. Para a verificação do comportamento do conceito com relação aos esforços impostos na condição mais crítica do sistema (entupimento), as condições impostas foram as seguintes:

- Restrição de fixação no flange e pinado nos furos para os parafusos;
- Pressão $P = 0,2306$ MPa distribuída em toda a área interna da bomba;
- Força peso somada a carga de pressão no eixo vertical.

Desta forma, na Figura 62, observa-se os resultados quanto a tensão de *Von Mises*:

Figura 63 - Análise de Tensão da Bomba.



Fonte: Autoria Própria.

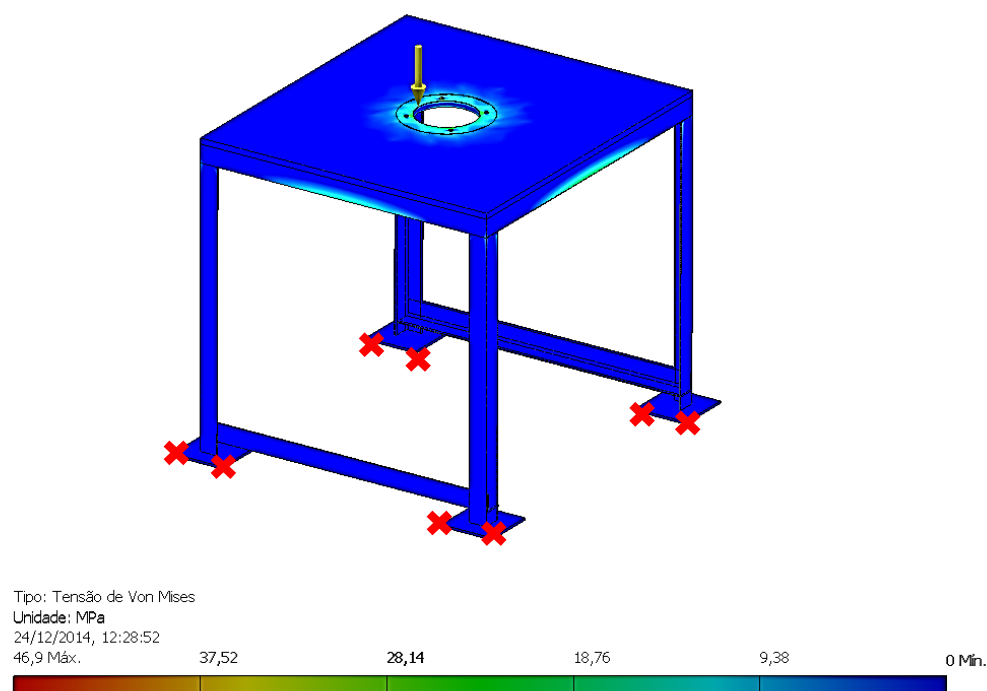
Percebeu-se os valores estão bem abaixo do limite de escoamento do material que é da ordem de 80 Mpa.

5.3.3. Subsistema Estrutura

Para o desenvolvimento da estrutura foram selecionados os aços estruturais de baixo carbono SAE 1020, por não haver necessidade de resistência a altas cargas, por seu baixo custo e pelo mesmo apresentar excelente soldabilidade. Foram utilizadas na pesquisa desenvolvida: Cantoneiras de abas iguais do tipo L 2"x2"x3/16", chapa de 1/4" para a base dos rodízios uma chapa de 5/8" para o tampo da mesa. Toda a estrutura foi soldada pelo processo soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, utilizando-se o eletrodo E6013, muito utilizado para soldar esse tipo de aço, que propicia um ótimo acabamento por gerar uma superfície mais uniforme do cordão, baixa penetração e menos respingos, o tornando ideal para a aplicação (Apostila de Eletrodos Revestidos ESAB, 2005).

Abaixo encontram-se os resultados da análise de tensão para a mesa e para o suporte do pistão em separado (Figuras 64 e 65):

Figura 64 - Análise de Tensão da Mesa.

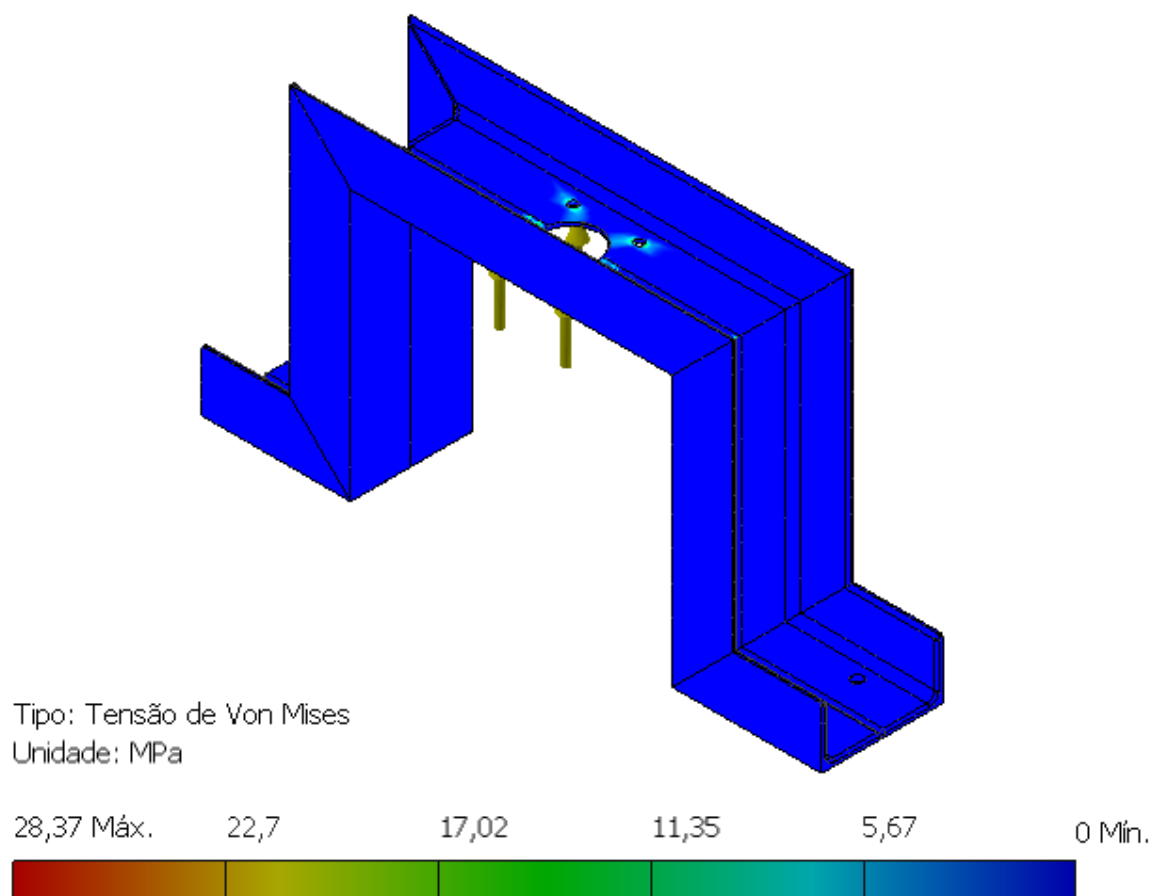


Fonte: Autoria Própria.

Para a análise da mesa foram impostas as seguintes condições:

- Restrição fixa (marcadas com um “x” vermelho) nas quatro bases de apoio;
- Carga $F = 1870,35 \text{ N}$ distribuída na área em contato com a flange e somada a carga Peso estimada para o equipamento.

Figura 65 - Análise de Tensão do Suporte.



Fonte: Autoria Própria.

Para a análise do suporte foram impostas as seguintes condições:

- Restrição fixa nas bases de contato com a mesa;

- Carga $F = 1870,35 \text{ N}$ dividida entre as áreas de contato da cabeça do parafuso (que liga o suporte ao pistão) e o suporte;

5.3.3.1. Seleção dos Rodízios

A seleção dos rodízios foi baseada na simulação da mesa, onde foi considerada as cargas reativas em cada apoio para o cálculo:

$$F_{\text{reação}} = (F_{\text{pistão}} + P) / 4 \quad (4)$$

$$F_{\text{reação}} = (1870,35 + 523,92) / 4 = 598,57 \text{ N}$$

$$F_{\text{reação}} = 61,04 \text{ kgf}$$

Desta feita, com base no catálogo disposto no ANEXO E, foi selecionado com segurança, um rodízio GL 158 ZZX da Novex com capacidade para 125kgf (Figura 66).

Figura 66 - Rodízio Utilizado



Fonte: www.novex.com.br, (2014).

5.3.4. Transporte Bomba-Molde

Os materiais utilizados neste sistema foram adquiridos inteiramente no comércio da cidade de Campina Grande, na empresa Só Mangueiras Ltda. Todas as dimensões para estas foram baseadas no projeto de Amorim (2007).

5.3.5. Subsistema Controle e Aquisição

5.3.5.1. Válvula de Controle da Vazão Volumétrica

Para a configuração e leitura da vazão volumétrica foi adquirida a válvula de controle na empresa Só Mangueiras Ltda. Uma válvula de controle de fluxo tipo agulha (Figura 66). Suas dimensões foram baseadas no sistema de transporte bomba-molde, a mesma conta com duas saídas para tubulação com diâmetro de 1/2" do tipo escama. O controle do *setup* da vazão é possibilitado abrindo ou fechando mais a válvula. Neste trabalho, duas configurações foram testadas: válvula totalmente aberta e com uma volta de fechamento, conforme a sessão 4.2.3.2.

5.3.5.2. Controle da Velocidade de Avanço

Para o sistema de medição da velocidade foi selecionada uma microcontrolador do tipo Arduino™ UNO e uma *Shield* do tipo sensor de ultrassom modelo HC – SR04, além de uma válvula pneumática reguladora de fluxo unidirecional, onde o sensor realiza a leitura, a placa a aquisição e processamento dos dados e o controle da velocidade é configurado na válvula.

5.3.5.3. Transmissor de Pressão

A seleção do sensor foi feita com base em alguns critérios descritos como: ser resistente a resina poliéster, a solventes orgânicos, temperatura de trabalho até 50°C, realizar a leitura numa faixa de pressão de 0 à 10bar, ser compatível com o sistema de aquisição *Agilent 34970A* e com alimentação até 28 Vcc, para ser utilizado em conjunto com a fonte *Agilent E3633A*. O sensor selecionado foi o transmissor de pressão *Mini VELKI®*, que dispõe de ótima precisão (0,25% F.E), é ideal para utilização em espaços reduzidos (Figura 67).

Figura 67 - Transmissor de Pressão.



Fonte: Autoria Própria.

Os subsistemas misturador e descarga não fazem parte do escopo do projeto detalhado, tendo em vista que o primeiro funcionar manual e para o segundo é utilizado o mesmo subsistema de acionamento.

5.4. PROJETO DETALHADO

O projeto detalhado do equipamento, constando dos desenhos técnicos com as dimensões e as especificações dos materiais utilizados no mesmo encontram-se disponíveis no ANEXO B.

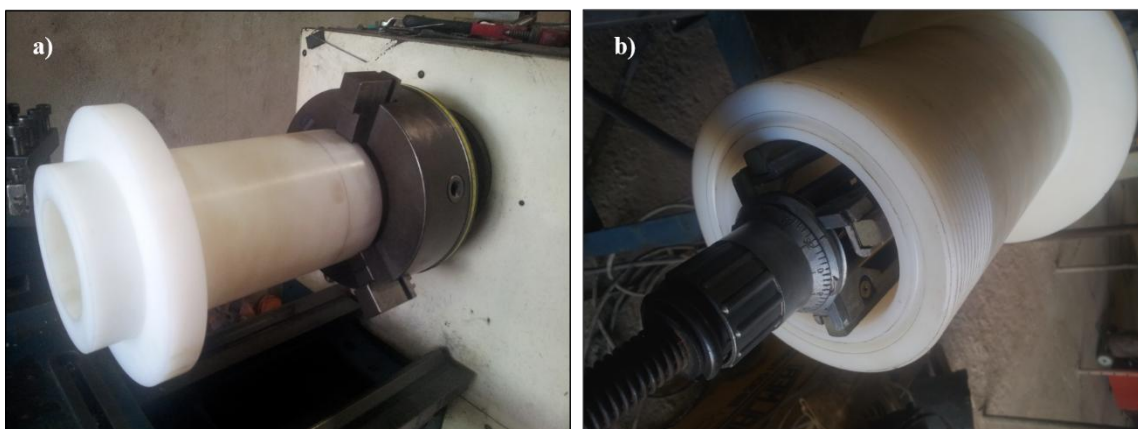
5.5. FABRICAÇÃO

A etapa subsequente, após definido o conceito do equipamento, definir seus materiais e dimensões, detalhar estas em desenhos técnicos, ocorreu a partir da sua fabricação de fato. Para tanto, foi realizado um levantamento nas oficinas mecânicas da cidade capacitadas para entregar o produto, com as especificações necessárias. A fabricação dos componentes da pesquisa foi realizada, na sua grande maioria, na oficina mecânica da unidade acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande e pequenas partes em outras oficinas da cidade.

O período de fabricação compreendeu de 30/05/2014 à 12/08/2014, no qual ocorreram visitas periódicas semanais, quando eram realizadas com o objetivo de averiguação do andamento, da fabricação e para o esclarecimento de possíveis dúvidas e realização de melhorias no projeto, por não se tratar de um projeto habitual nas oficinas. Durante esse período, foi realizado o registro das atividades e as mais importantes podem ser observadas nas figuras subsequentes desta sessão.

Na Figura 68a, expõe-se o procedimento de usinagem da camisa de *Nylon Nital®* via torneamento e na Figura 68b, observa-se um processo chamado de Brunimento, que é uma usinagem de acabamento interno, necessário, neste caso, para garantir as tolerâncias definidas no projeto preliminar, conferindo um perfeito deslizamento, sem permitir vazamento da mistura fluida.

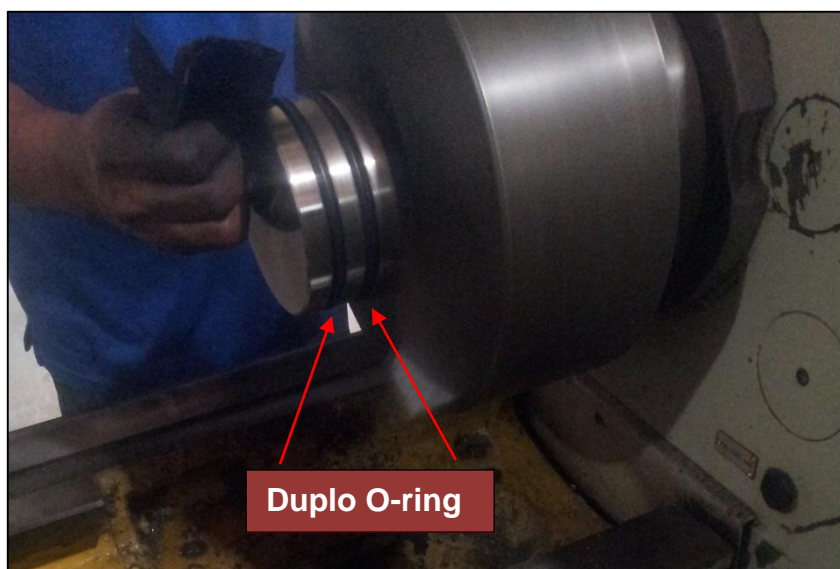
Figura 68 - Fabricação: a) Torneamento da Camisa e b) Brunimento da Camisa.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 69, observa-se o processo final de ajuste da superfície do êmbolo com uma lixa fina Nº 1200, que tem por finalidade proporcionar um melhor acabamento superficial e retirar as possíveis rebarbas e imperfeições. Percebe-se, ainda, o duplo o-ring em detalhe.

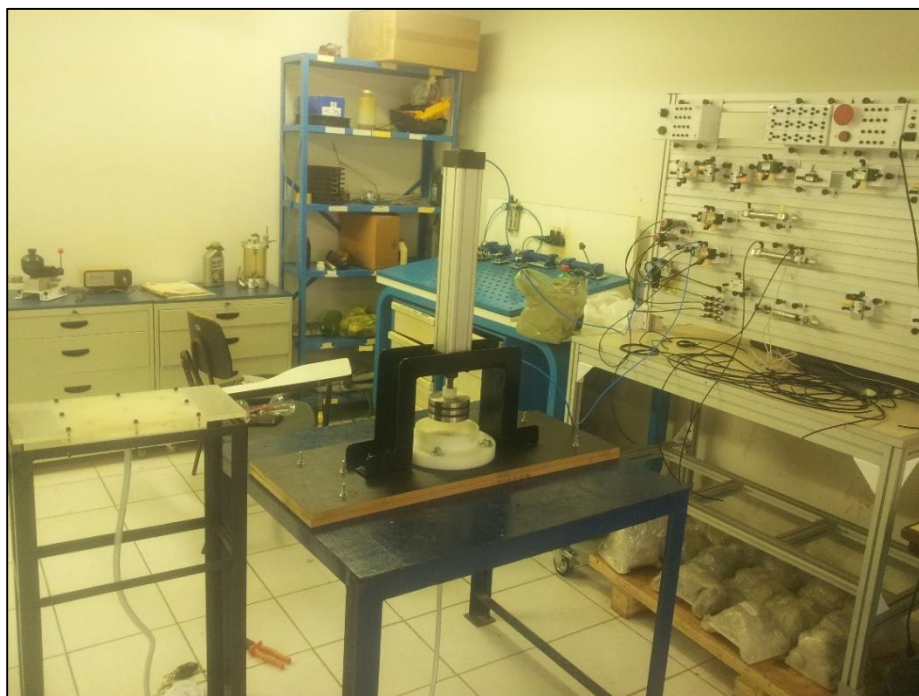
Figura 69 -Acabamento do Êmbolo.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 70, apresenta-se o equipamento de injeção de resina fabricado com todos os seus sistemas montados, pronto para realização do primeiro teste de injeção da estação de processamento que será mais detalhado na sessão 5.8.1.

Figura 70 - Equipamento de Injeção de Resina por RTM Concebido.



Fonte: Autoria Própria.

5.6. TESTES

Após todas as etapas concluídas com sucesso, foi dado início a fase de testes do equipamento. Buscou-se uma varredura do seu funcionamento, na tentativa de identificar as não conformidades de fabricação, que pudessem fazer com que o equipamento não trabalhasse de maneira adequada, como exemplo: vazamentos nas vedações, inconformidade de ajuste entre a camisa e êmbolo, o que poderia causar muito atrito ou vazamento por sobre o êmbolo, descentralização entre a camisa e êmbolo, entre outros. Ainda, nesta fase, o equipamento foi testado para avaliar sua capacidade em termos de vazão de injeção máxima, pressão de injeção máxima, força de avanço experimental e

velocidade de avanço do pistão. Para tanto, foram desenvolvidas várias montagens (seção 3.2) e uma bancada para teste do sensor de ultrassom (mais detalhes na seção 5.6.3.1).

5.6.1. Verificação Inicial

Com a chegada das peças fabricadas nas oficinas, foi iniciada a etapa de testes. O primeiro teste realizado constou de uma verificação inicial, onde foi realizada uma análise visual e tátil da condição do conjunto camisa-tampa e do êmbolo, que apresentaram uma condição satisfatória, sem ranhuras ou ressaltos. Após esta fase, foi realizada a injeção com água para averiguar as condições de vedação do equipamento onde foi atestada a sua condição para utilização. Nenhum vazamento foi verificado nas duas condições de teste: em injeção, como pode ser observado na figura 71 e sob uma possível condição de entupimento, onde é fechada completamente a saída da mangueira. A verificação inicial foi feita com a pressão máxima (configurada na UTA) fornecida pelo compressor: 6bar.

Figura 71 - Injeção com Água Destilada.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 14 - Resultados do Teste Inicial.

Pontos de Verificação	Condição	Método de Verificação	Resultado
Acabamento da camisa	Única	Tátil/Visual	Conforme
Acabamento da tampa	Única	Tátil/Visual	Conforme
Acabamento do êmbolo	Única	Tátil/Visual	Conforme
Vedação êmbolo-camisa	Injeção/Crítica	Visual	Conforme
Vedação camisa-tampa	Injeção/Crítica	Visual	Conforme
Vedação conexão da tampa	Injeção/Crítica	Visual	Conforme
Vedação da mangueira	Injeção/Crítica	Visual	Conforme

Fonte: Autoria Própria.

Com os resultados obtidos, o equipamento foi considerado apto para o teste de injeção de resina por RTM.

5.6.1.1. Vazão de Injeção

Como uma das verificações iniciais, foi realizado a averiguação da capacidade de vazão volumétrica de injeção máxima do equipamento. Os testes se deram conforme metodologia descrita na sessão 4.2.3.2 e os resultados estão expostos na Tabela 15.

Tabela 15 - Vazão media.

Resultados da Vazão Volumétrica (ml/s)		
Totalmente aberta	21,61	± 0,42
1 Volta	24,71	± 0,61

Fonte: Autoria Própria.

O valor máximo da vazão volumétrica média $u_{\text{méd.máx}} = 24,71$ ml/s demonstrando a capacidade do equipamento quanto a esta propriedade.

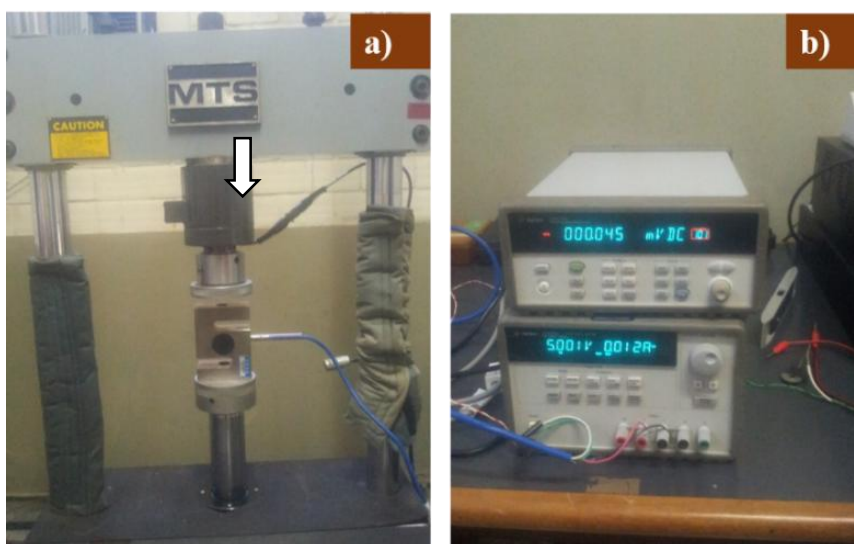
5.6.2. Força de Avanço Experimental do Cilindro Pneumático

5.6.2.1. Calibração da Célula de Carga

Para a determinação da força real do pistão, de acordo com, a metodologia descrita na seção 4.2.3.3, foi necessária a realização de uma calibração da célula de carga. O objetivo é relacionar os valores de tensão (V), com valores de força (N), e assim obter uma função para uma faixa de valores de força.

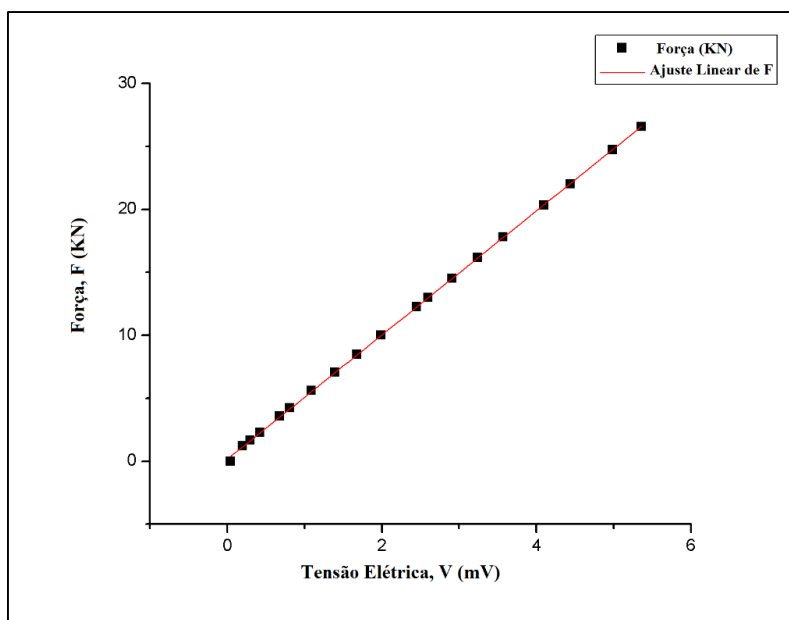
Para realização desta, foi feita uma montagem, representada na Figura 72, onde a célula de carga foi acoplada à máquina de ensaios MTS® (Instrumento calibrado) observados na Figura 72a e ligada ao sistema de aquisição (Fig. 72b). Foi variada a força, dentro da capacidade da célula, que é de 5 Tf. Para cada ponto, começando do zero de carga foi feita a leitura de tensão e a partir dele e do seu valor do coeficiente de correlação linear R^2 , que mensura a associação entre as variáveis, foi gerada uma equação relacionando tensão e força.

Figura 72 - Montagem da Calibração: a) Célula de Carga Montada, b) Sistema de Aquisição.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 73 - Gráfico de Calibração da Célula de Carga.



Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 16 será encontrada a equação da reta gerada no gráfico, os valores obtidos para a intercessão, o coeficiente angular e também o valor do R^2 .

Tabela 16 - Dados Extraídos do Gráfico de Calibração

Equação	$y = a + b * x$	-----
R^2	0,99985	-----
-----	-----	Valor
-----	Intersecção (a)	0,16345
-----	Coeficiente angular (b)	4,9322

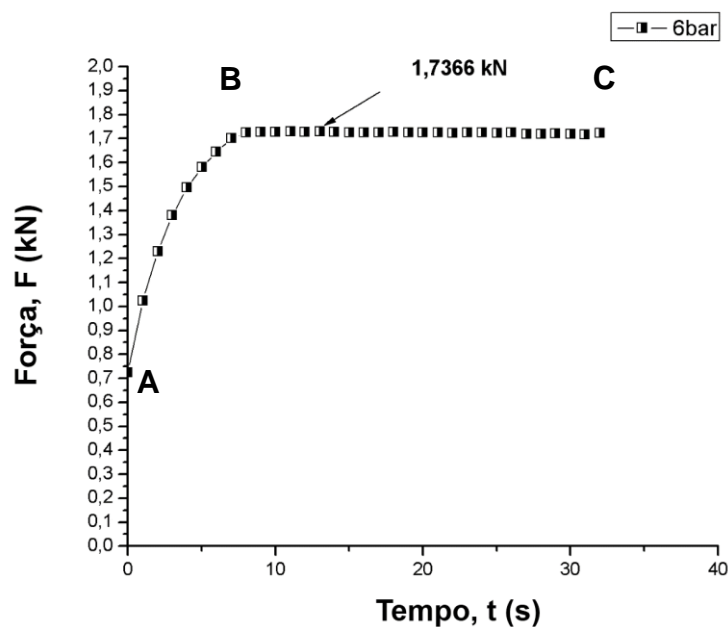
Fonte: Autoria Própria

5.6.2.2. Testes da Força de Avanço Experimental do Cilindro Pneumático

O procedimento e a montagem para a realização deste teste estão descritos na seção 4.2.3.3. A figura 74 apresenta o perfil de curva $F \times t$ obtido no experimento para a

pressão de 5bar. As curvas obtidas para as demais pressões exibiram perfis semelhantes e estão dispostas no ANEXO I da presente dissertação.

Figura 74 - Gráfico da força experimental do pistão pelo tempo.

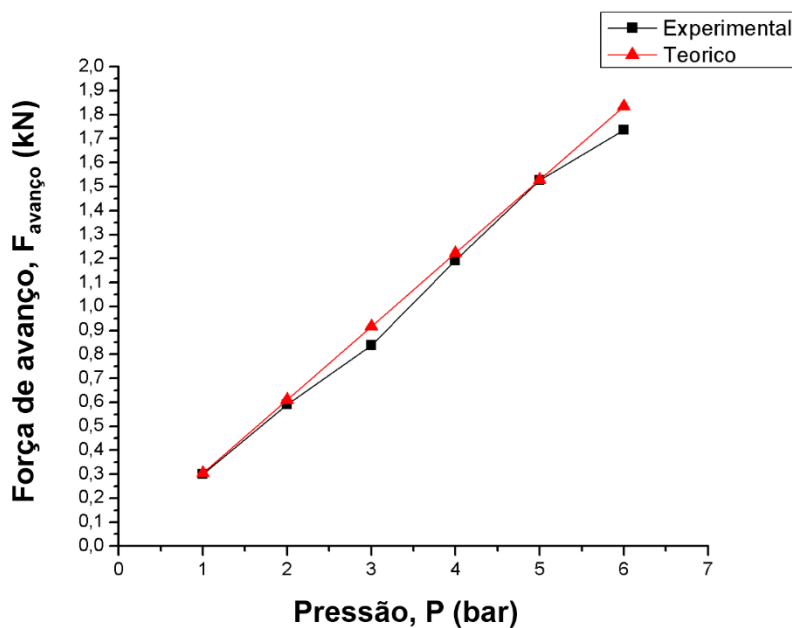


Fonte: Autoria Própria.

O trecho AB apresenta um crescimento rápido da força em um espaço de tempo de aproximadamente 8 segundos. Isto ocorre devido ao impacto gerado quando o cilindro toca a célula de carga e segue aumentando até a estabilização de F. No trecho BC a carga se estabiliza e não há mais acréscimo de F, é nesse trecho também onde se encontra a força máxima ($F_{\text{máx}} = 1,7366 \text{ kN}$), em detalhe no gráfico.

O gráfico a seguir representado na Figura 75 é uma comparação entre os valores obtidos no experimento e os valores da força de avanço teórica fornecida pelo catálogo do fabricante.

Figura 75 - Comparação analítico/experimental da força de avanço do cilindro pneumático (kN) pela pressão (bar).



Fonte: Autoria Própria.

É observado que a curva experimental segue a tendência da curva teórica, com uma maior discrepância nas medições de 3 e 6bar, sendo a última a que difere da curva experimental com o maior valor: em torno de 0,1 kN. Estas diferenças podem ocorrer por pequenas folgas entre a camisa e o êmbolo do cilindro pneumático, por sujeira dentro da camisa ou por pequenos vazamentos em mangueiras e conexões entre a UTA e o cilindro.

5.6.2.3. *Pressão Máxima Experimental*

Para um êmbolo com o diâmetro $d_e = 4$ in, teremos que a pressão máxima ($P_{m\acute{a}x}$) exercida pelo conjunto pode ser obtida pela equação 4:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (4)$$

Onde, A é a área da seção transversal do êmbolo. Colocando os valores na equação, temos que:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1736,6}{0,00811} = 0,214 \text{ Mpa}$$

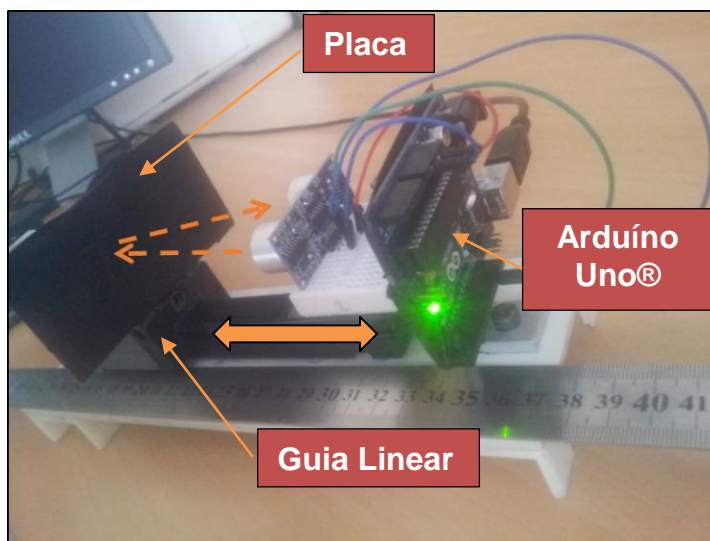
Assim, tem-se que $P_{m\acute{a}x} = 2,14\text{bar}$. Sendo esta a capacidade máxima de pressão, que o êmbolo fornecerá ao fluido dentro da camisa.

5.6.3. **Velocidade de Avanço do Pistão**

5.6.3.1. *Calibração do Sensor de Ultrassom*

Foi desenvolvida uma bancada para a calibração de sensores de ultrassom do modelo utilizado na pesquisa. Para tanto, utilizou-se um guia linear com uma chapa de alumínio plana com dimensões de 100mmx70mm para variar a distância. A comparação para verificação da coerência da medição se deu por meio de uma régua *Vonder®*, que nesta montagem foi a fonte confiável (Vide figura 76). As medições foram realizadas por faixa: foi colocado o sensor a uma distância inicial de 2cm da placa plana, e foi-se realizando, manualmente, o afastamento, onde foi verificado, que, até 2,3cm, o mesmo realizava a leitura de 2cm. O mesmo, foi realizado para as outras cinco faixas.

Figura 76 - Bancada Desenvolvida para a Calibração do Sensor de Ultrassom.



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 17 e como se pôde perceber, os dados estão coerentes com o que é disposto no *datasheet* do sensor (ANEXO E), o qual estabelece que o erro é de até 0,3cm.

Tabela 17 - Resultados da Calibração do Sensor de Ultrassom.

Faixa Varrida (cm)	Valor Medido pelo Sensor (cm)	Erro (cm)
2,0 ---- 3,0	2,0	+ 0,3
3,0 ---- 4,0	3,0	+ 0,3
4,0 ---- 5,0	4,0	+ 0,3
5,0 ---- 6,0	5,0	+ 0,3
6,0 ---- 7,0	6,0	+ 0,3
7,0 ---- 8,0	7,0	+ 0,3

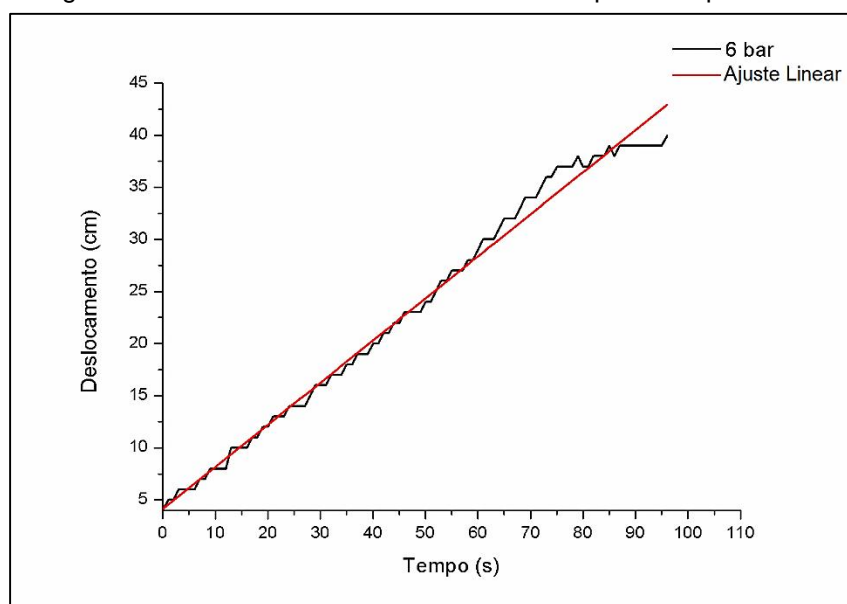
Fonte: Autoria Própria.

5.6.3.2. *Teste de Velocidade de Avanço do Pistão*

Inicialmente foi testada a montagem com o equipamento funcionando em um procedimento de injeção, mas a montagem não propiciou resultados satisfatórios, tendo em vista que o sensor não conseguia realizar leituras acompanhando o êmbolo até o final do curso do pistão. Este, a partir de 15 cm parava a sua leitura, por estar projetando sua onda na camisa e não mais no êmbolo. Foi modificada a montagem (Seção 4.2.3.1), retirando-se a camisa e foi realizada uma “leitura em vazio” ou seja, uma leitura desconsiderando o atrito entre o êmbolo e a camisa. Desta feita, obteve-se um resultado de velocidade média máxima em condições ideais.

O gráfico apresentado na Figura 77 demonstra o perfil entre o deslocamento (d) e o tempo (t) para uma pressão na UTA de 6bar. Resultados similares foram obtidos para pressões de 1 à 5bar. Estes gráficos são apresentados para consulta no ANEXO H.

Figura 77 - Perfil do Deslocamento do Cilindro pelo Tempo.



Fonte: Autoria Própria.

A curva é ajustada linearmente (reta em vermelho).

Na Tabela 18, dispomos da equação da reta gerada no gráfico, os valores obtidos para a intercessão e o coeficiente angular e também o valor do R^2 .

Tabela 18 - Dados Extraídos do Gráfico d x t.

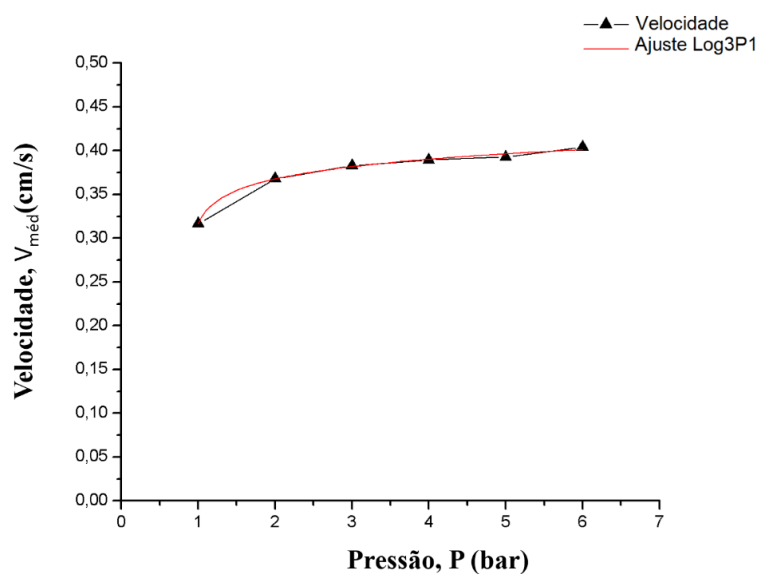
Equação	$y = a + b * x$	-----
R^2	0,99063	-----
-----	-----	Valor
-----	Intersecção (a)	4,13086
-----	Coeficiente angular (b)	0,40406

Fonte: Autoria Própria.

Percebe-se, então, que, pela derivada da função da reta, a velocidade é constante, por conseguinte, a mesma em todos os pontos é igual ao coeficiente angular da reta (b). Então, $V_{\text{méd.}} = 0,404 \text{ cm/s}$.

A partir dos resultados de $V_{\text{méd.}}$ obtidos para as seis configurações do experimento (1 a 6bar) foi traçada a curva a seguir (Figura 78).

Figura 78 - Gráfico da Velocidade do Cilindro pelas Pressões na UTA.



Fonte: Autoria Própria.

A curva anterior representada na Figura 78 foi bem ajustada como uma função logarítmica do tipo Log3P1, apresentando um valor de $R^2 = 0,99$. As velocidades médias variam entre 0,316 e 0,404 cm/s.

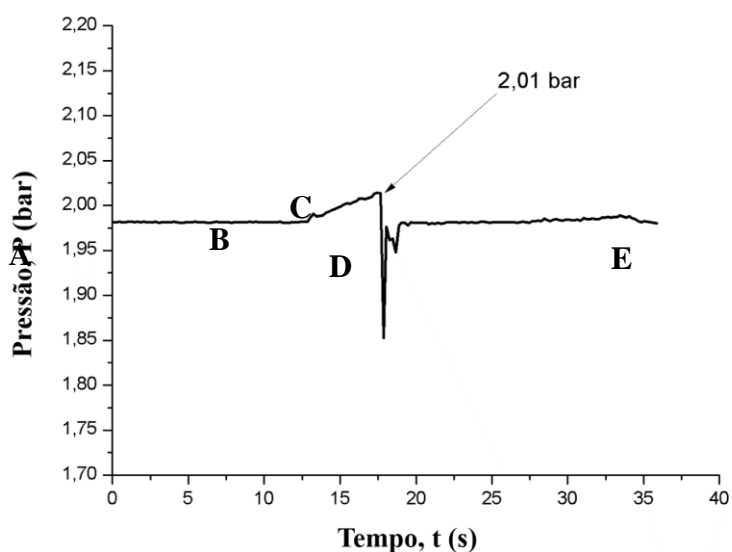
Ao analisar o gráfico por trechos, percebe-se uma tendência quase constante para os valores das velocidades correspondentes ao trecho de 2 a 6bar. Para 1bar a velocidade difere da tendência. Foi constatado para os experimentos realizados com este nível de pressão, que o pistão avançava com uma maior dificuldade, mas mesmo com esta diferença maior entre o ponto 1 do gráfico e os demais, para a velocidade esta discrepância é da ordem de centésimos: $\Delta V = 0,05\text{cm/s}$.

A tabela com os coeficientes, a equação e o ajuste para a curva $V_{\text{méd.}} \times P$ encontra-se disponível no ANEXO L.

5.6.4. Pressão Máxima de Injeção

A averiguação do comportamento da pressão foi realizada de acordo com a metodologia montada para tal (seção 4.2.3.4). O resultado está disposto no gráfico da figura 79.

Figura 79 - Perfil da Pressão de Injeção.



Fonte: Autoria Própria.

O trecho AB compreende a leitura quando o êmbolo é acionado, mas ainda não está em contato com o fluido. A pressão, constante nesse trecho é, aproximadamente, 1,98bar. Esta pressão é devido ao fluido (água), estar preenchendo e pressurizando o sistema (bomba+condutos), bem como o sensor. No ponto B do trecho BC o êmbolo inicia seu contato com a resina, há uma acentuação no nível da pressão, até chegar-se à pressão máxima de injeção em C, $P_{\text{máx.inj.}} = 2,01\text{bar}$ em aproximadamente 17,5 segundos após o início do teste. No trecho CD há uma queda no valor da pressão, chegando a níveis aproximados de 18,5bar. Em seguida, o nível da pressão retorna a valores levemente mais baixos que no trecho inicial, no trecho DE.

Um resultado importante notado com este ensaio é a pequena diferença da pressão identificada com o auxílio da metodologia descrita na seção 5.6.4.2 que foi de 2,14bar para a máxima pressão gerada pelo sistema a 6bar, que foi da ordem de 2,01bar. A diferença de pressão entre o que é gerado no pistão e a saída da bomba é: $\Delta P = 0,13\text{bar}$. Em termos percentuais, tem-se uma perda de 6,07%. Ainda, a solução adotada para o subsistema bomba-molde com base em Amorim (2007) foi adequada para prevenir perdas ao evitar válvulas de fechamento rápido entre o equipamento e o molde e utilizar estrangulamento externo (Ver seção 5.2.6).

5.7. PROJETO DO MOLDE

5.7.1. Definição dos Requisitos

O projeto do molde partiu de algumas necessidades de projeto para sua fabricação: o molde deve ser transparente para permitir o estudo do escoamento da resina dentro do molde; possuir várias entradas e saídas para permitir várias configurações de injeção e ser de fácil fabricação. O material de base do molde deve suportar pressões de até 3bar e o carregamento inerente ao peso sem que haja deflexão das placas de forma a prejudicar a qualidade da parte compósita. Para teste foi escolhida

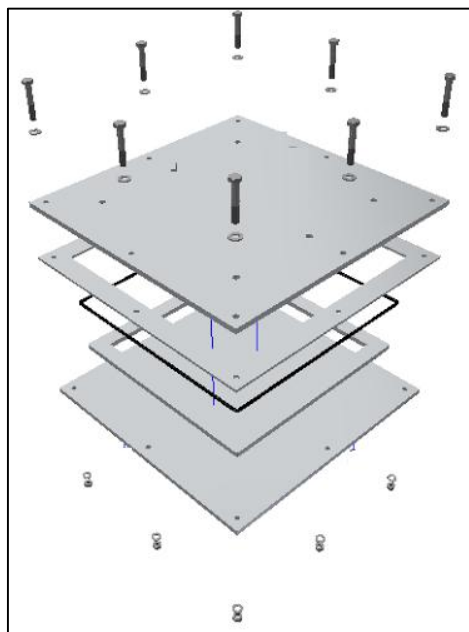
a estrutura placa por ser de vasta aplicação estrutural (indústria aeronáutica, náutica, militar) além de ser utilizada em blindagem de veículos e habitáculos.

Referenciais teóricos foram estudados para balizar a fabricação do mesmo, tais como: Amorim (2007), Garay (2010), Steenkamer (1994), Jiang et al. (2001), Cavalcanti (2014) e Anström (1997).

5.7.2. Concepção

A partir dos requisitos estabelecidos e dos trabalhos estudados na fase anterior, foi possível gerar um conceito próprio para o molde, onde o mesmo conta com dimensões de 340x340x5mm e é concebido em acrílico, possui vedação do tipo o-ring e tampas para saídas de ar em Nylon 6 da Nytanil®. Vide Figura 80:

Figura 80 - Concepção do Molde para Injeção por RTM em Vista Explodida.



Fonte: Autoria Própria.

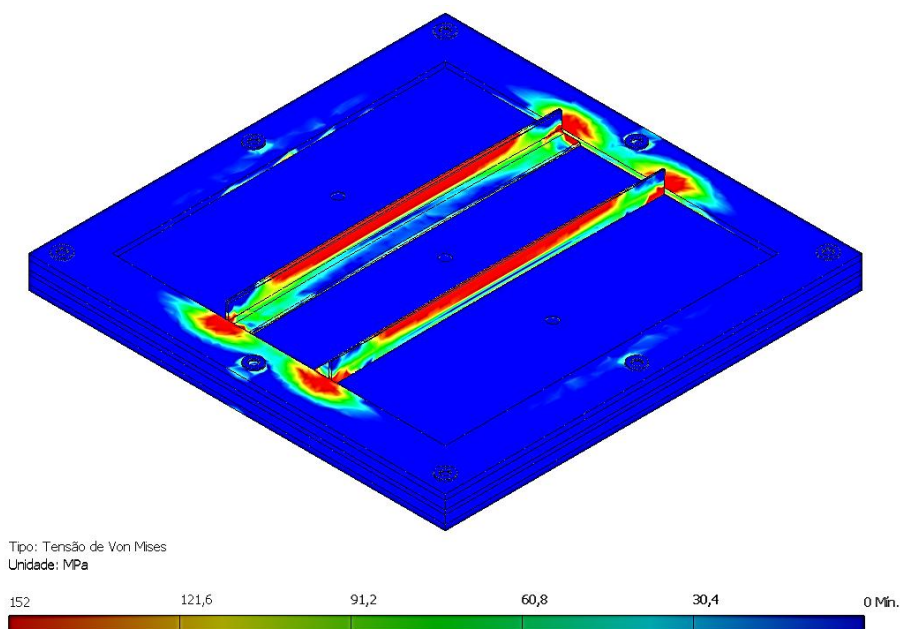
Os desenhos técnicos desta concepção estão dispostos no ANEXO C.

5.7.3.1. Seleção do Material das Placas Superior e Inferior

Como o material o molde deveria ser rígido o suficiente para suportar o carregamento e as pressões impostas em trabalho, optou-se por utilizar materiais respaldados pelos trabalhos de Cavalcanti (2014), Amorim (2007) e Steenkamer (1994) os quais utilizaram acrílico para permitir o estudo da frente de escoamento. Com base em cálculos iniciais, foi observado que as tensões impostas pela pressão de injeção seriam maiores que o L_e do acrílico, para placas de 10mm. Assim, foi proposto um reforço estrutural. Realizou-se uma simulação numérica no Autodesk Inventor 2013, versão do estudante com as seguintes hipóteses e condições de contorno:

- A placa é isotrópica (mesmas propriedades mecânicas em todas as direções);
- As cargas impostas são normais e uniformemente distribuídas;
- As condições de fixação são: moldura e pinadas no parafuso;

Figura 81 - Análise da Tensão para a Placa.



Fonte: Autoria Própria.

Percebe-se que os valores para as tensões de Von Mises estão abaixo dos limites de escoamento. Na parte metálica, as tensões chegam a níveis de 152 MPa, sendo o limite de escoamento do aço AISI 1020 igual a 210MPa. Na placa de acrílico as tensões chegam a níveis de 15MPa, abaixo do limite de escoamento deste material que é de 49 MPa.

Desta forma a espessura estabelecida no projeto (10mm) foi mantida. O espaçador foi mantido com a espessura de 5mm conforme Cavalcanti (2014).

5.7.3.2. *Dimensionamento da Vedação*

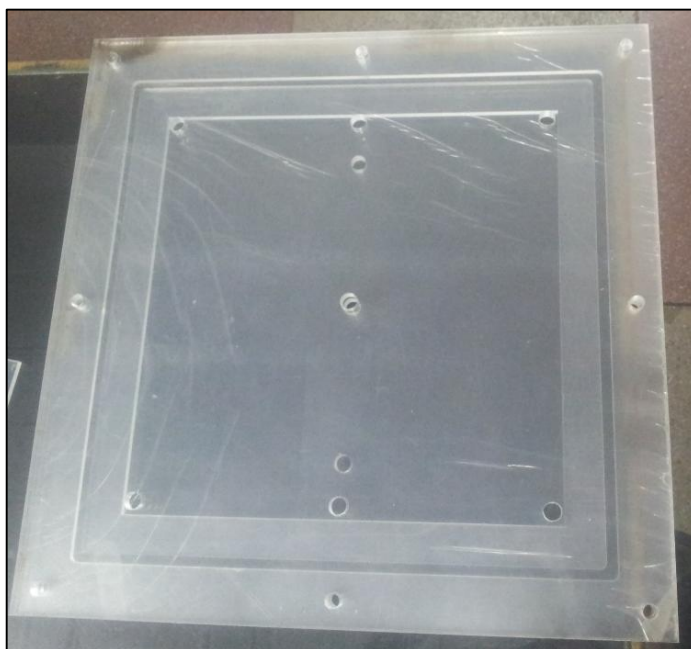
O dimensionamento foi feito com base no catálogo do fabricante Trelleborg® para um o-ring de 6,0mm de seção transversal com aplicação estática. Seu comprimento de arco ficou em 1600mm. Após os testes realizados para pressões de injeção maiores que 5bar percebeu-se a necessidade de reforçar a vedação, em detrimento de vazamentos. Então, utilizou-se uma vedação de 8mm de seção transversal e mesmo comprimento, garantindo uma vedação eficiente.

Os demais sistemas do molde como as entradas e saídas foram baseados em Amorim (2007), que utilizou várias configurações de entrada de mistura fluida e saída de ar. Estas eram determinadas com auxílio de uma tampa. Neste trabalho uma concepção própria para esta vedação é apresentada no anexo B.

5.7.3.3. *Fabricação*

A fabricação do molde se deu, em quase sua totalidade, por meio de corte a laser realizado em uma máquina (DESCRIÇÃO TÉCNICA DA MÁQUINA) na empresa Kromme Ltda., situada também na cidade de Campina Grande (Figura 83).

Figura 82 - Molde Fabricado em Acrílico.



Fonte: Autoria Própria.

As tampas de vedação foram fabricadas na oficina mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG, todas elas fabricadas em Nylon e por usinagem. Na Figura 83 tem-se a peça em estágio de finalização.

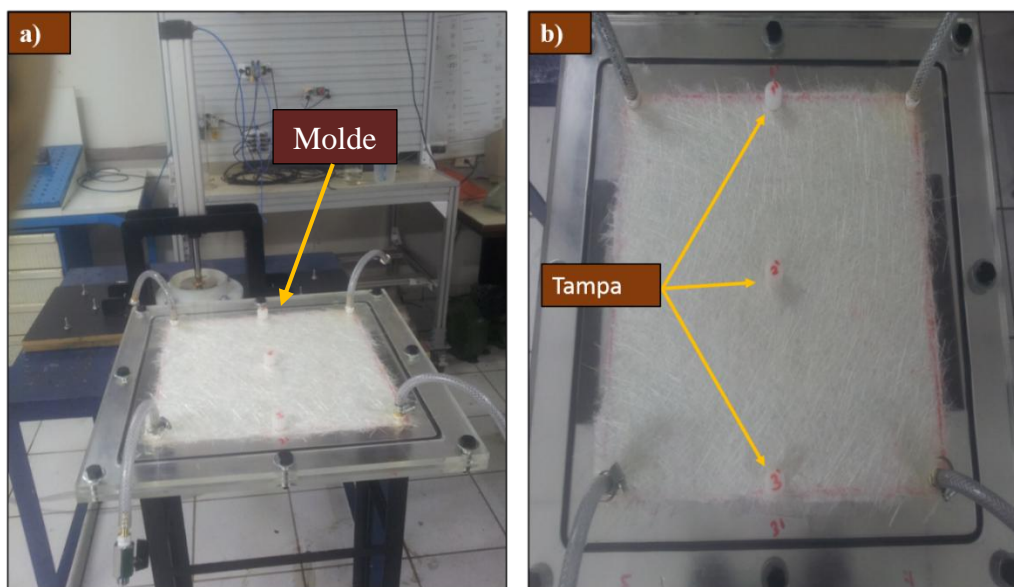
Figura 83 - Vedação tipo Tampa em Processo de Fabricação.



Fonte: Autoria Própria.

Não obstante, na Figura 84 pode-se observar o molde fabricado, com suas devidas vedações, pronto para realização de uma injeção.

Figura 84 - Molde Fabricado.

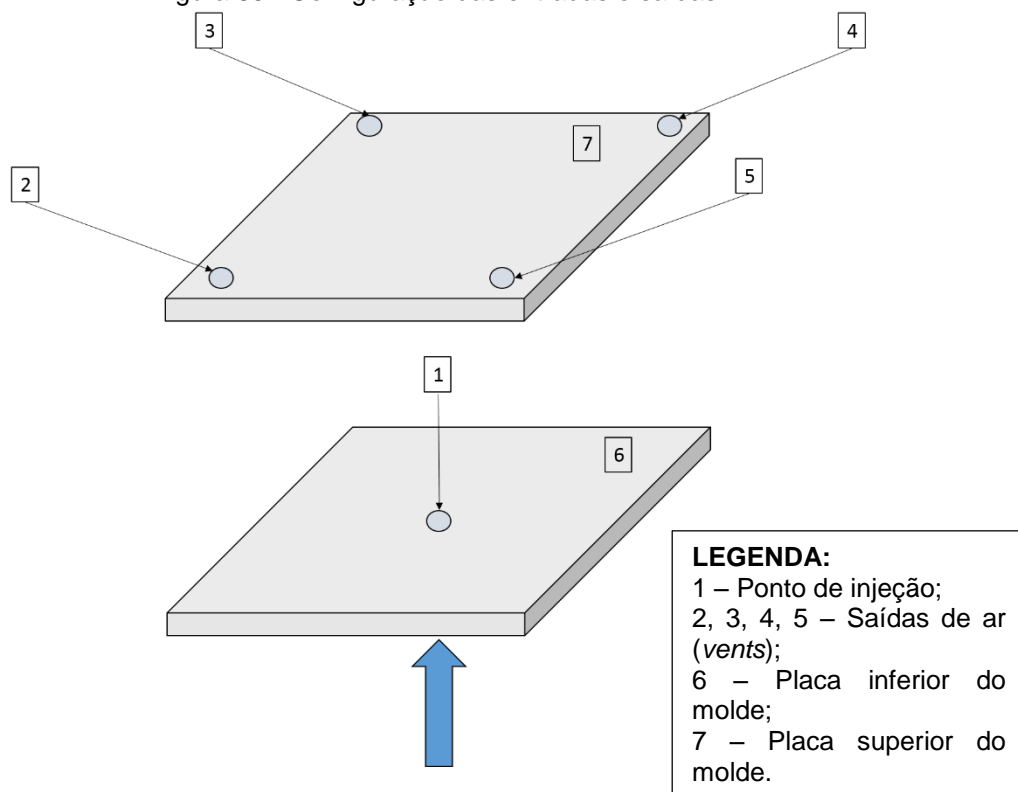


Fonte: Autoria Própria.

5.8. Testes de Processamento com Estações Desenvolvidas no Laboratório de Projeto de Instrumentos (LPI)

Com o término das fases referentes ao projeto e fabricação, foi iniciada a etapa de testes da capacidade do equipamento de injetar placas de pequena área e placas de grande área para uma espessura de 5mm. Todas as injeções foram realizadas com a seguinte configuração: Injeção no ponto central da placa inferior do molde e saídas de ar nas quatro extremidades da placa superior (Figura 85). As condições dos testes são apresentadas na Tabela 19.

Figura 85 - Configuração das entradas e saídas.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 19 - Parâmetros dos Testes.

Teste	Dimensão da placa (mm)	Pré-forma		Pressão na UTA (Bar)	Volume de resina (ml)	Porcentagem de catalisador (%)
		Tipo de reforço	Nº de camadas			
1	175x125x5	Manta	3	3	600	3
2	175x125x5	Manta	3	4	600	3
3	340x340x5	Manta	4	3	1000	3
5	340x340x5	Tecido	4	4	1000	1
6	340x340x5	Tecido	6	5	2000	0,5
7	340x340x5	Tecido	7	6	2000	0,5
8	340x340x5	Tecido	7	6	2000	0,5

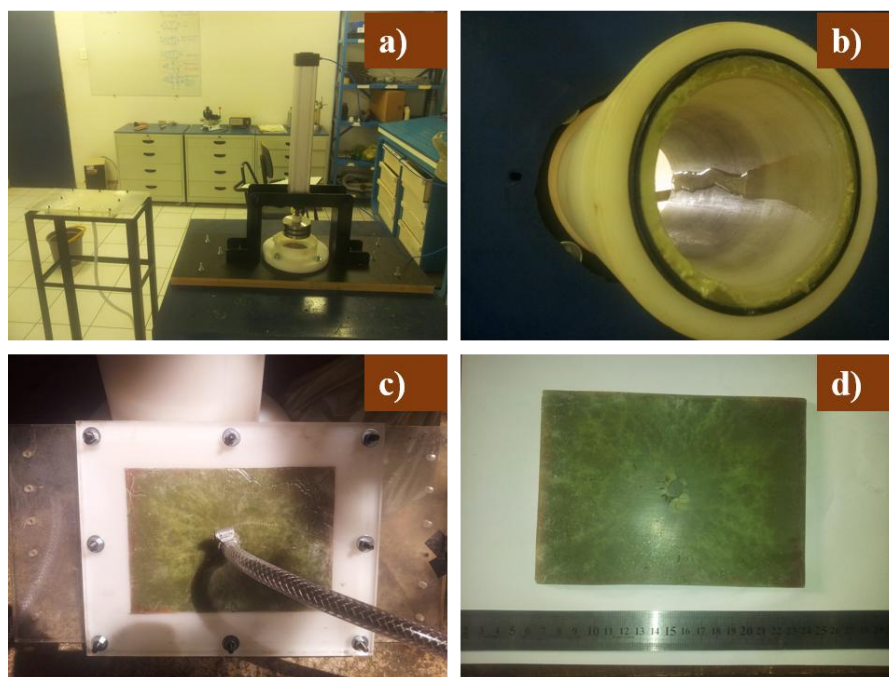
Fonte: Autoria Própria.

5.8.1. Teste de Pequena Área

5.8.1.1. Teste com 3bar

A primeira tentativa de injeção foi realizada no laboratório de máquinas hidráulicas e pneumáticas do departamento de engenharia mecânica da UFCG. Para tanto foi utilizada resina de poliéster insaturada, catalisador e manta para laminação Mekol®, sendo a manta com gramatura de 450g/m² e o catalisador com uma porcentagem de 3% em relação ao volume da resina. A pressão na UTA foi ajustada em 3 bar. Já na primeira tentativa a placa foi obtida com sucesso, demonstrando que o equipamento é capaz de realizar a injeção de resina poliéster em um molde fechado, validando assim o mesmo. Ainda com isto, foi validado, para tal equipamento, o processamento de placas compósitas finas com as dimensões de 175mmx125mmx5mm. Vide Figura 86.

Figura 86 - a) Montagem, b) Demonstração da eficiência da vedação, c) Placa no espaçador e d) Vista superior da placa obtida.



Fonte: Autoria Própria.

Os valores dimensionais médios, peso e densidade da placa estão apresentados no Quadro 10 que se segue. Para cada valor de dimensão foram tomadas 3 medidas, assim, os valores apresentados são as médias entre estas.

Quadro 10 - Dimensionamento, Peso e Densidade da Placa Processada.

Placa 01		
Dimensão (mm)	Comprimento	174,84
	Largura	125,00
	Espessura	4,89
Massa (g)	-----	153,32
Densidade (g/cm³)	-----	1,4346

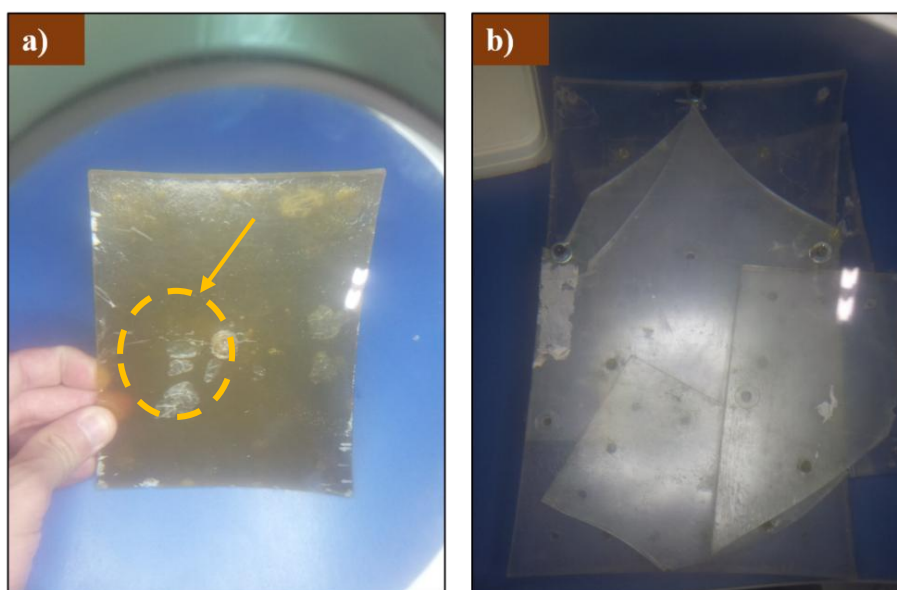
Fonte: Autoria Própria.

Percebe-se uma coerência com os valores obtidos por Cavalcanti (2014), com discrepâncias entre os valores obtidos e os de referência menores que 5%, demonstrando assim, o sucesso no processamento deste tipo de placas com estas dimensões.

5.8.1.2. Teste com 4bar

Para o segundo teste a pressão na UTA foi alterada para 4 bar. Com esta configuração a resina passou a vazar pelas laterais do molde levando consigo boa parte do reforço fibroso. Ao se perceber este vazamento o teste foi interrompido e esperou-se a cura da resina no molde. Após a cura foi dado início a extração da placa onde foi verificado que a resina tinha atingido os elementos de fechamento do molde (porcas, parafusos e arruelas) o que impossibilitou a sua retirada de forma convencional. Nesta tentativa de extração o molde foi inutilizado. Na Figura 87a pode-se observar a placa extraída com baixíssima quantidade de fibra e vários vazios em detalhe. Na Figura 87b pode-se observar o molde após a extração.

Figura 87 - a) Molde Desativado e b) Placa com baixa quantidade de fibra.



Fonte: Autoria Própria.

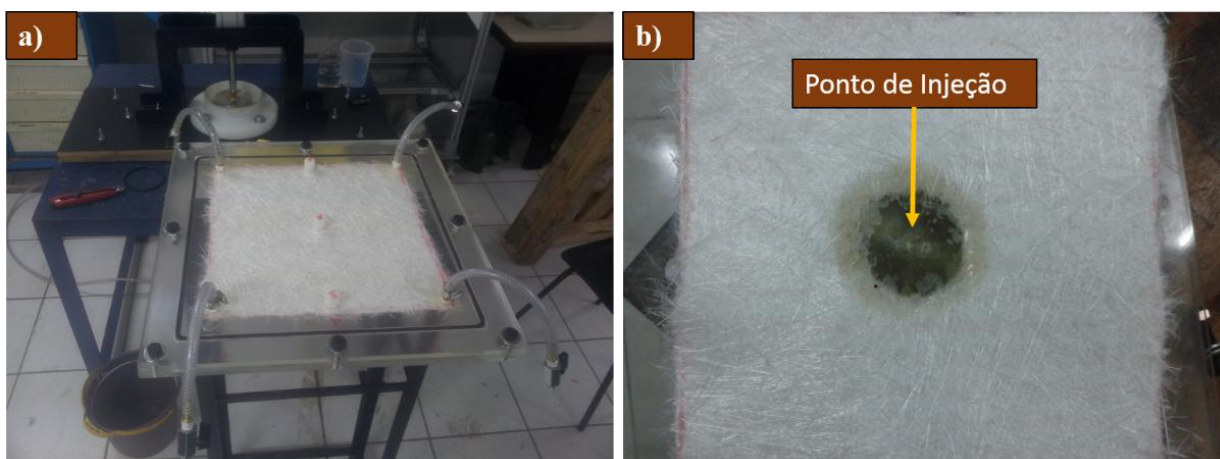
Dentro deste prisma, notou-se que a vedação por interferência proporcionada pelo molde desenvolvido por Cavalcanti (2014) era insuficiente para pressões maiores ou iguais a 4bar. Desta forma, foi desenvolvido neste trabalho um molde com vedação do tipo *o-ring* (ver seção 5.7).

5.8.2. Teste de Grande Área

5.8.2.1. Teste com 3 bar

O primeiro teste de injeção de uma placa com grande área foi realizado com os seguintes parâmetros de processo: mistura de 1 litro de resina e 1% de catalisador (em volume), pré-forma com quatro camadas de manta (gramatura de 450g/m^2) a uma pressão de 3bar na UTA. A montagem e os resultados obtidos nesse teste podem ser observados na Figura 88.

Figura 88 - Primeiro Teste com o Novo Molde: a) Montagem, b) Pequena quantidade de resina injetada.



Fonte: Autoria Própria.

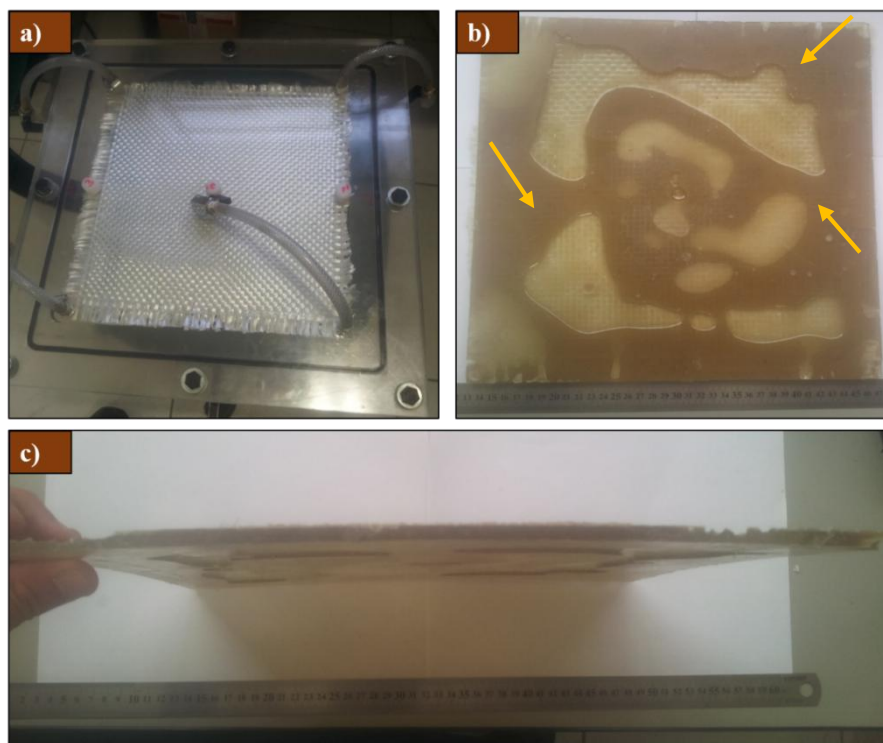
O primeiro teste de processamento com a estação desenvolvida para processamento de placas de grandes áreas falhou em obter uma placa. Ao acionar-se a bomba foi observado (durante um tempo de 1 minuto), que a resina não conseguia romper a barreira da espessura. Esperou-se um tempo limite de 5 minutos, devido a quantidade de catalisador na mistura e como não houve mudança no resultado observado o teste foi abortado, iniciando-se os ciclos de solvente.

A partir deste resultado percebeu-se que: a pressão de 3bar é insuficiente para injetar uma placa com 4 camadas de manta com gramatura de 450g/m² nesta estação de processamento;

5.8.2.2. Teste com 4bar

No segundo teste foram alterados os seguintes parâmetros: reforço, pressão na UTA e volume de catalisador. Modificou-se o reforço fibroso, pelo tecido com gramatura de 600g/m² por este apresentar uma maior facilidade de processamento no que tange ao corte, diminuindo o tempo de preparação da pré-forma de 1 hora para 10 minutos. Foi alterada a pressão na UTA de 3 para 4bar, justificada pelo teste anterior e o volume de catalisador, que passou de 3 para 1%, propiciando um maior tempo de trabalho (*gel time*). Na Figura 89 observa-se as condições do teste e os resultados.

Figura 89 - Segundo Teste com o Novo Molde: a) Montagem, b) Vista superior da placa injetada e c) Vista lateral da placa injetada.



Fonte: Autoria Própria.

O segundo teste de processamento com a estação desenvolvida para processamento de placas de grandes áreas falhou em obter uma placa. O sistema propiciou o escoamento do fluido dentro do molde, mas devido a um pequeno vazamento em uma conexão do subsistema de transporte bomba-molde a quantidade de resina injetada foi insuficiente para preencher toda a pré-forma. Depois de injetar toda a resina que dispunha o sistema findou por injetar ar no molde, favorecendo a formação de bolsões de ar na placa. A figura 100a apresenta a pré-forma de tecido dentro do molde, a figura 100b a vista superior da placa injetada com e os referidos bolsões destacados e a figura 100c a vista lateral da placa.

Houve, ainda, outro defeito decorrente da baixa quantidade de camadas da pré-forma. Diferentemente da manta, 4 camadas de tecido não ocuparam completamente o espaço entre a placa superior e a inferior, gerando um fenômeno conhecido como *flow on top*, que é a tendência do fluido escoar entre a pré-forma e a superfície interna do

molde formando uma camada rica de resina (Gebart e Strömbeck, 2000). Como pode ser visto em detalhe na Figura 90, a maior espessura medida a partir da última camada de fibra a superfície superior da placa possuía o valor da ordem de 3,23mm.

Figura 90 - Efeito do Flow on Top.



Fonte: Autoria Própria.

Desta feita, foi verificada a necessidade de aumentar o número de camadas, por conseguinte, aumentar a pressão de injeção, trocar as conexões defeituosas e o volume de resina disposta na bomba.

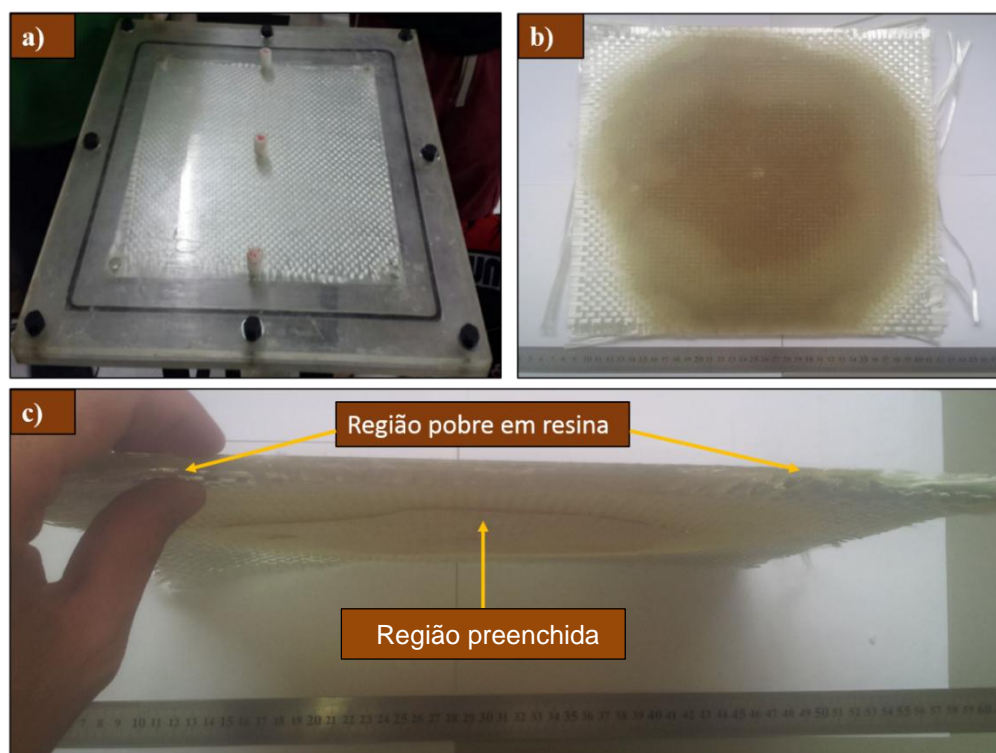
5.8.2.3. Teste com 5bar

No terceiro teste de injeção foi utilizada uma pré-forma com 6 camadas de tecido com gramatura de 600g/cm^3 , pressão na UTA de 5bar, 2 litros de resina. A porcentagem de catalisador foi reduzida por ter-se aumentado o volume de resina Amorim (2007)

relata que “a cura da resina é acelerada proporcionalmente à sua quantidade, devido à maior liberação de calor durante a reação de polimerização e, consequentemente, diminuição do tempo de gelificação e aumento da viscosidade.” Desta feita a porcentagem de catalisador foi diminuída para 0,5% do volume de resina.

Na figura 91 tem-se as condições de injeção e os resultados deste teste.

Figura 91 - terceiro Teste com o Novo Molde: a) Montagem, b) Vista inferior da placa injetada e c) Vista lateral da placa injetada.



Fonte: Autoria Própria.

O terceiro teste de processamento com a estação desenvolvida para processamento de placas de grandes áreas falhou em obter uma placa. A figura 91a apresenta a pré-forma de tecido dentro do molde, a figura 91b a vista superior da placa e na figura 91c, destacadas, a região preenchida e a região pobre em resina.

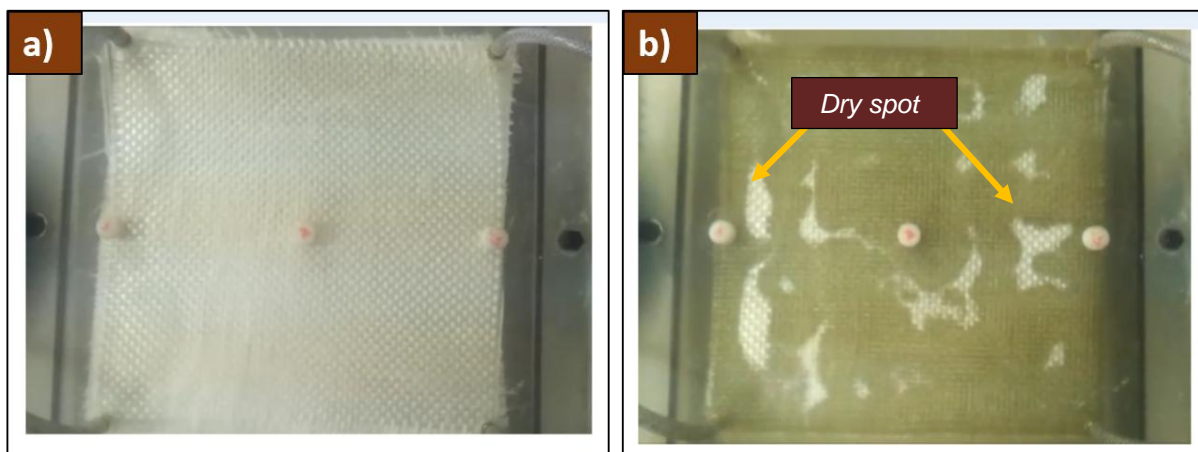
A resina conseguiu vencer a barreira da pré-forma e penetrar as camadas superiores da fibra, preenchendo mais de 50% da pré-forma, mas com uma velocidade de avanço muito baixa. Depois de 10 minutos de teste, sem haver nenhuma modificação aparente na frente de escoamento, o teste foi abortado e os ciclos de cura realizados.

A partir deste resultado percebeu-se que: a pressão de 5bar é insuficiente para injetar uma placa com 6 camadas de tecido com gramatura de 600g/m² nesta estação de processamento;

5.8.2.4. Teste com 6bar sem catalisador

No quarto teste de injeção foi utilizada uma pré-forma com 7 camadas de tecido com gramatura de 600g/m², pressão na UTA de 6bar, 2 litros de resina, sem catalisador. Na figura 92 tem-se as condições de injeção e o resultado.

Figura 92 - Quarto Teste com o Novo Molde: a) Montagem, b) Vista superior do molde.



Fonte: Autoria Própria.

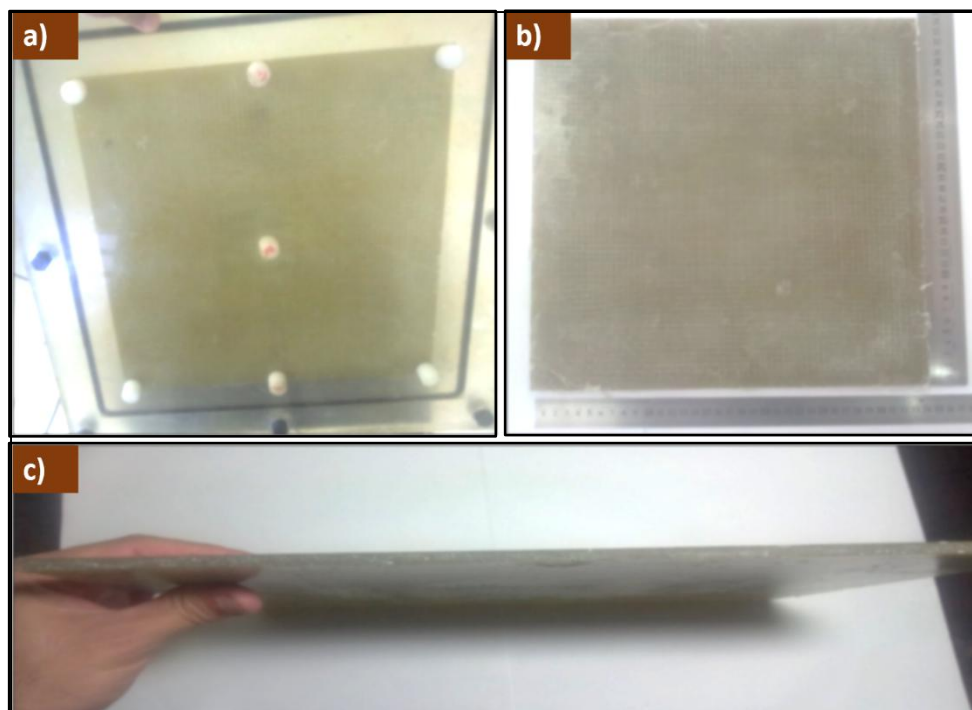
Na figura 92a, tem-se a montagem, momentos antes da injeção e na figura 92b, a montagem depois da injeção. Percebe-se que a pré-forma foi quase totalmente preenchida, com exceção de regiões conhecidas por *dry-spots*, que são regiões indesejáveis, desprovidas de resina (HSIAO; ADVANI, 2004). A formação destes pontos, na região oposta ao ponto de injeção são características de um escoamento muito rápido, desta forma, faz-se necessária a diminuição da velocidade de avanço do pistão.

5.8.2.5. Teste com 6bar e catalisador

No quarto teste de injeção foi utilizada uma pré-forma com 7 camadas de tecido com gramatura de 600g/m^2 , pressão na UTA de 6bar, 2 litros de resina e 0,5%. Para a diminuição da velocidade do pistão, foi utilizada uma válvula reguladora de fluxo unidirecional Belair®, entre a válvula pneumática de 5/2 vias e o cilindro pneumático.

Na figura 93 apresentam-se as condições de injeção e os resultados.

Figura 93 - Quinto Teste com o Novo Molde: a) Molde preenchido, b) Vista superior da placa injetada e c) Vista lateral da placa injetada.



Fonte: Autoria Própria.

O quinto teste de processamento com a estação desenvolvida para processamento de placas de grandes áreas obteve sucesso em processar uma placa. Houve o completo preenchimento da pré-forma (Figura 93a) e nas Figuras 93b e 93c tem-se a vista frontal e lateral da placa após a extração. Esta foi a primeira placa com

grande área, validando o processo descrito e a segunda placa produzida com sucesso no projeto.

Os valores dimensionais médios, peso e densidade da placa estão apresentados no Quadro 11 que se segue. Para cada valor de dimensão foram tomadas 3 medidas, são apresentados, então, valores médios.

Quadro 11 - Dimensionamento, Peso e Densidade da Placa Processada.

Placa 01		
Dimensão (mm)	Comprimento	340,00
	Largura	340,00
	Espessura	5,70
Massa (g)	-----	1090,00
Densidade (g/cm³)	-----	1,6542

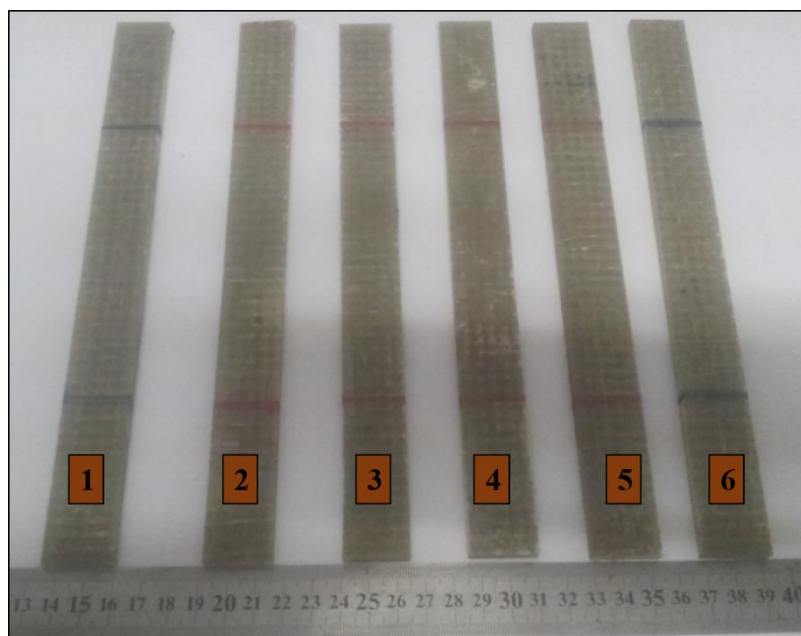
Fonte: Autoria Própria.

5.9. Caracterização Mecânica

5.9.1. Ensaio de Tração

O ensaio de tração dos corpos de prova da placa processada com tecido bidirecional de fibra de vidro tipo E (Figura 95) se deram de acordo com a norma ASTM D3039/D3039-14.

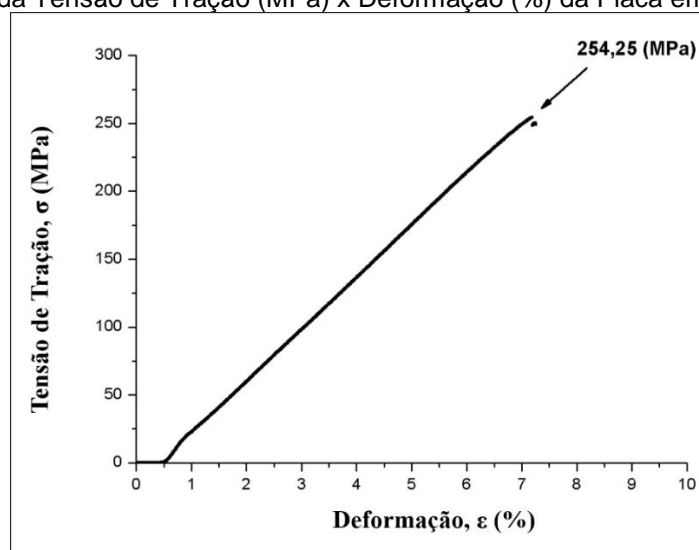
Figura 94 - Corpos de Prova para o Ensaio de Tração.



Fonte: Autoria Própria.

Na figura 96 está apresentado o resultado para o ensaio de tração do corpo de prova 06. Os demais gráficos referentes ao ensaio de tração seguem esta tendência e estão dispostos no ANEXO J.

Figura 95 - Gráficos da Tensão de Tração (MPa) x Deformação (%) da Placa em Tecido (CP06).



Fonte: Autoria Própria.

Nota-se inicialmente um escorregamento ou o que podemos chamar de uma acomodação por não ser utilizada uma pré-carga, então a tensão começa a subir a partir de valores de deformação acima de 0,5%. A Tabela 20 apresenta os resultados médios obtidos para a tensão de tração máxima ($\sigma_{\text{máx}}$), deformação de ruptura em porcentagem (ϵ_{rup}) e os respectivos desvios em torno das médias.

Tabela 20 - Propriedades Mecânicas Médias Obtidas no Ensaio de Tração.

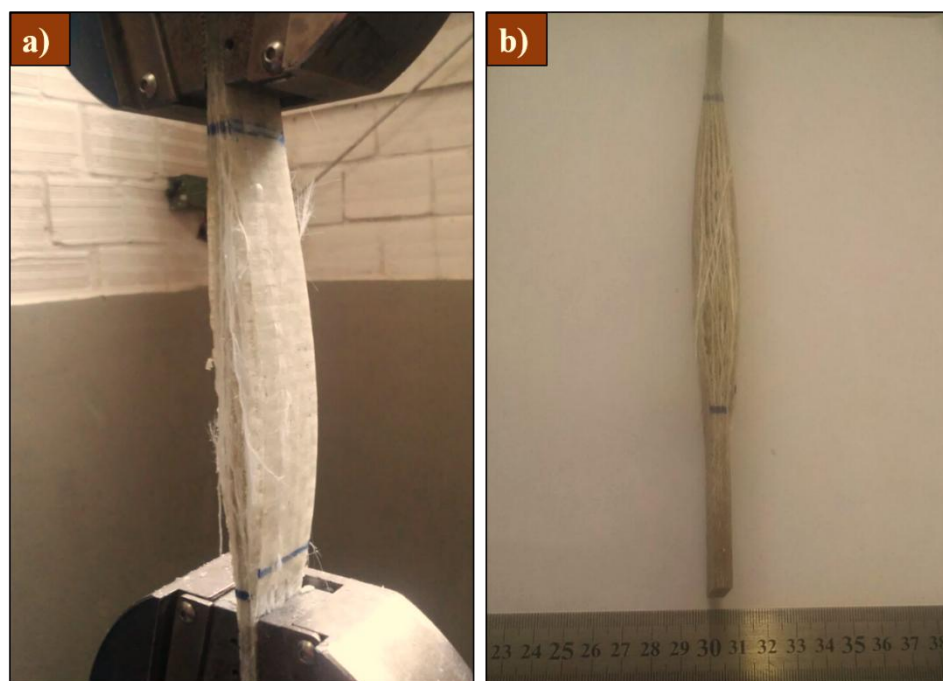
Propriedades mecânicas	Valores médios	Desvio-padrão
Tensão Máxima (MPa)	238,59	$\pm 17,69$
Deformação de Ruptura (%)	6,71	$\pm 0,44$

Fonte: Autoria Própria.

Se faz importante ressaltar que os desvios em torno da média em valores absolutos são baixos: em torno de 7,41% para $\sigma_{\text{máx}}$ e 6,56% para ϵ_{rup} .

A Figura 96 apresenta uma análise macroscópica do dano sofrido por um dos corpos de prova imposto ao ensaio de tração após a sua ruptura final.

Figura 96 - Fratura do Corpo de Prova Compósito: a) Durante o ensaio e b) Após o ensaio.



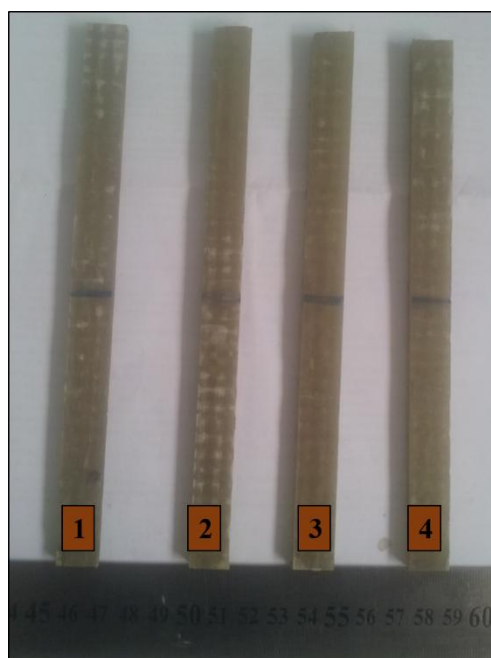
Fonte: Autoria Própria.

Conforme a referida norma praticada neste ensaio, a fratura ocorrida é do tipo XGM, sigla em inglês que significa que a fratura foi do tipo: explosiva, na área do comprimento útil e no meio do corpo de prova.

5.9.2. Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão se deu conforme a metodologia explicitada na seção 4.2.4.6. Foram utilizados cinco corpos de prova do tipo apresentado na Figura 97.

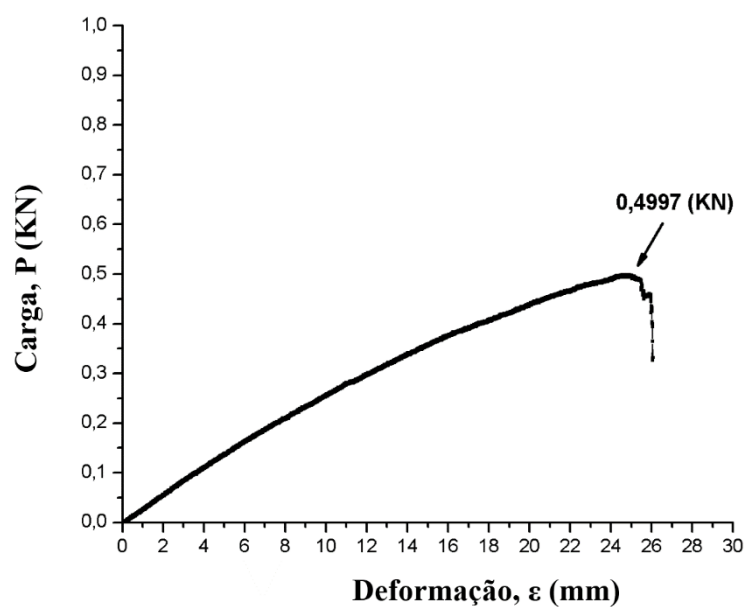
Figura 97 - Corpos de Prova para o Ensaio de Flexão.



Fonte: Autoria Própria.

O resultado para o CP05 pode ser observado na Figura 99 a seguir.

Figura 98 - Gráficos da Carga (KN) x Deformação (mm) da Placa em Tecido (CP05).



Fonte: Autoria Própria.

As curvas para os demais corpos de prova (ANEXO K) se comportaram de maneira similar, dando a ideia de homogeneidade à placa.

A Tabela 21 apresenta os resultados médios obtidos para a carga de flexão máxima ($P_{\text{máx}}$), deformação de ruptura em porcentagem (ϵ_{rup}) e os respectivos desvios em torno das médias.

Tabela 21 - Propriedades Mecânicas Médias Obtidas no Ensaio de Flexão.

Propriedades mecânicas	Valores médios	Desvio-padrão
Carga de Flexão Máxima (KN)	0,42	$\pm 0,04$
Deformação de Ruptura (mm)	20,37	$\pm 3,54$

Fonte: Autoria Própria.

Não obstante, os desvios em torno da média em valores absolutos para o ensaio de flexão, assim como os encontrados no de tração são relativamente baixos: em torno de 9,52% para $P_{\text{máx}}$ e 17,37% para ϵ_{rup} .

A Figura 99 apresenta uma análise em vias macroscópicas dos danos, agora, sofridos pelos corpos de prova impostos ao ensaio de flexão após a sua ruptura final. Na Figura 99a tem-se o corpo de prova nos instantes finais do ensaio de flexão, enquanto na Figura 99b pode-se observar o corpo de prova após a realização do ensaio.

Figura 99 - Fratura do Corpo de Prova Compósito: a) Durante o ensaio e b) Após o ensaio.



Fonte: Autoria Própria.

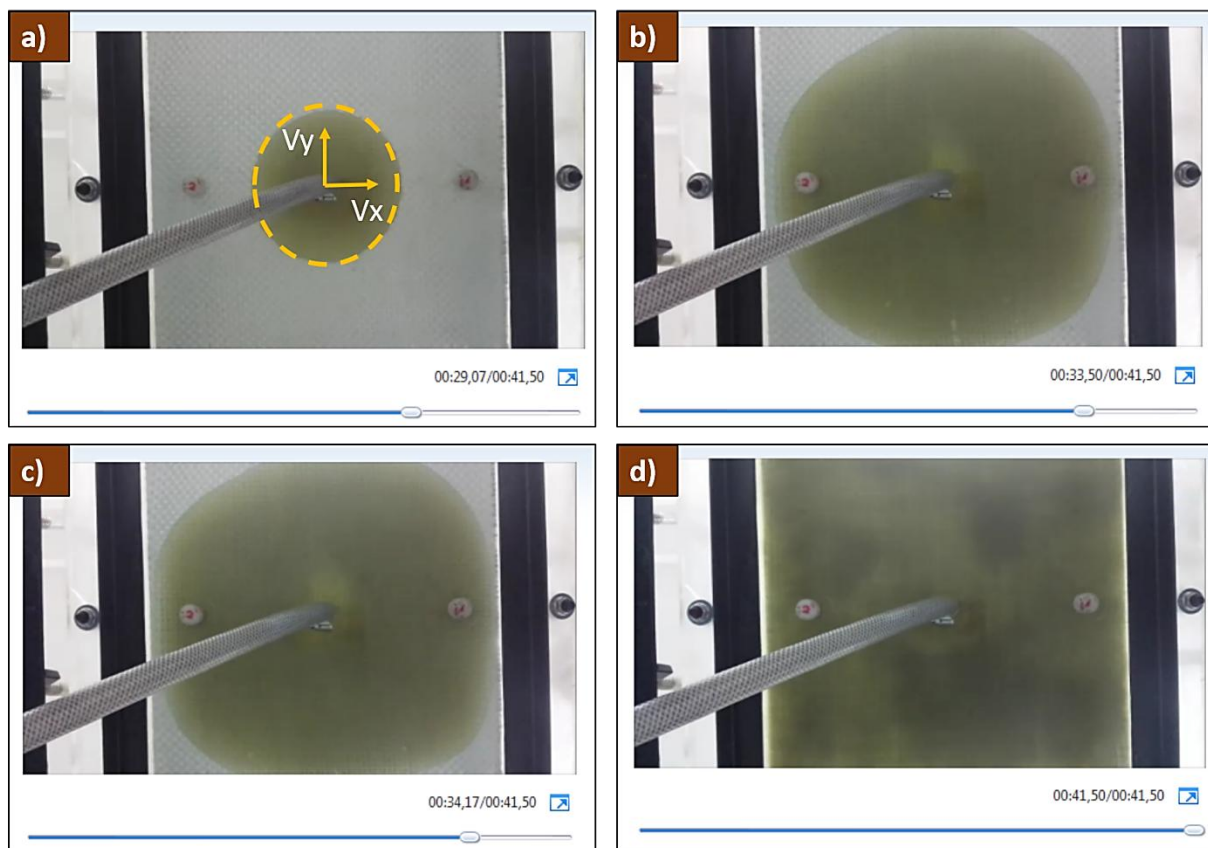
Conforme a norma seguida no ensaio a fratura é do tipo SSM, sigla em inglês que significa: Cisalhamento interlaminar, no suporte, no meio.

5.10. ESTUDO DA VELOCIDADE DE PREENCHIMENTO NO MOLDE

5.10.1. Velocidade Média de Avanço em x e em y Tomadas no Ponto de Injeção

Na quinta injeção foi filmada a frente de escoamento a partir do ponto de injeção. O tempo foi medido a partir do início da formação da frente, em 26,83s até a resina encostar em uma das arestas do molde, as quais distam 170mm do centro. Na figura 100 é observada a frente de escoamento em diferentes instantes de tempo e o formato da frente de escoamento.

Figura 100 - Frente de escoamento em vários instantes de tempo: b) 29,07s, c) 33,50s, d) 34,17s e 41,50s.



Fonte: Autoria Própria.

Como pode-se notar pela figura 92a o formato apresentado é levemente elíptico, mas a velocidade da frente de escoamento nos eixos x e y são diferentes. Sendo assim, procedeu-se, de acordo com as imagens o cálculo das velocidades médias de avanço e os resultados estão dispostos na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores das Velocidades Médias de Avanço em x e y.

Velocidade média no eixo x (V_x) em mm/s	Velocidade média no eixo y (V_y) em mm/s
23,29	25,48

Fonte: Autoria Própria.

O formato da frente de escoamento foi elíptico e o tempo de preenchimento do molde foi de 15 segundos.

6. CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados obtidos com o equipamento de RTM desenvolvido, com as variáveis de processamento selecionadas e o sistema fibra-resina adotado no presente trabalho de pesquisa, pode-se concluir que:

- Foi possível a concepção de 2 conceitos de equipamento RTM no trabalho de pesquisa: o primeiro, visando atendimento do mercado e o segundo, de uso laboratorial;
- Com o segundo conceito, foi possível a redução de vários componentes estruturais e uma redução de peso da ordem de 73,91 e 87,59% comparados ao primeiro conceito, respectivamente;
- Foi desenvolvido com sucesso (projeto e fabricação) uma Estação de Processamento por Moldagem de Transferência de Resina de uso laboratorial para materiais compósitos de concepção própria;
- Foi possível, com o equipamento de RTM projetado e fabricado neste trabalho fabricar placas compósitas com pré-forma de manta de pequena área (21875mm^2) e placas compósitas com pré-forma 7 camadas de tecido com grande área (115600mm^2) e espessura entre 5 e 6mm;
- O arranjo aprovado para o uso em todas as placas compósitas fabricadas por RTM neste trabalho de pesquisa foi: ponto de injeção central e quatro saídas de ar nas extremidades;
- Não foi possível a fabricação de compósitos com pequena área utilizando manta de gramatura de 450g/m^2 com pressões acima de 4bar;
- Não foi possível a fabricação de compósitos com grande área utilizando manta com o sistema de fibra-resina e com os parâmetros de processo adotados (4 bar);

- Não foi possível a fabricação de compósitos com grande área com 6 camadas de tecido com os parâmetros de processo adotados (5 bar).
- O arranjo testado para tecido: ponto de injeção central de resina na tampa superior e quatro saídas de ar sem controle de fluxo no avanço propiciou molhamento incompleto das camadas de fibra. A superfície superior da placa apresentou, ao longo da sua área, regiões não molhadas conhecidas na literatura por *dry spot*.
- Foi desenvolvida uma metodologia preliminar para medição da força de avanço do cilindro pneumático onde a diferença máxima entre os valores das curvas teórica e experimental foi por volta de 0,1 kN;
- Foi desenvolvida uma metodologia para a verificação da velocidade de avanço do pistão pneumático do equipamento desenvolvido, por meio de sensor de ultrassom;
- Foi desenvolvida uma metodologia para a medição da pressão de injeção máxima do equipamento desenvolvido, através da utilização de um transmissor de pressão no final do subsistema bomba-molde constatando que as perdas de pressão no sistema em termos percentuais, foram de 6,07%;
- Foi possível manter a espessura das placas acrílicas superiores e inferiores em 10mm, graças a um reforço estrutural, constituído de duas cantoneiras em L com abas iguais de 1/4"x1/4" ligando as extremidades internas da moldura do suporte;
- Em sistemas pneumáticos como desenvolvido, é necessário o ajuste da velocidade do pistão por meio de uma válvula de controle de fluxo unidirecional, para que o cilindro não atue com velocidade excessiva, gerando, dependendo da configuração do processo, o deslocamento ou a deformação da pré-forma.

7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Processar e caracterizar placas compósitas com diferentes resinas, reforços e espessuras na estação de processamento desenvolvida;
- Estudo do processamento de materiais compósitos por RTM variando as configurações de entrada e saída de ar do molde;
- Estudo da permeabilidade dos compósitos processados por RTM na estação de processamento desenvolvida;
- Modelamento matemático do equipamento de injeção de resina desenvolvido;
- Desenvolvimento e estudo da melhor configuração de saída da bomba no intento de diminuição de perdas localizadas;

8. REFERÊNCIAS

Amico, S., Lekakou, C. **An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding**. Composites Science and Technology, Vol 61, pp. 1945 – 1959. 2001.

JÚNIOR, W. F. A. **Processamento de placa espessa de compósito através de Moldagem por Transferência de Resina**. Tese de Doutorado – Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007. 232p.

Apostila de Eletrodos Revestidos ESAB. Disponível em <<http://www.esab.com.br/br/pt/>> Acessado em Julho de 2014.

ASHBY, M.F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 3 ed. Elsevier, 2005.

ÅSTRÖM, TOMAS. **Manufacturing of Polymer Composites**. 1. ed. United Kingdom: Nelson Thornes Ltd, 2002. 469p.

ASTM D3039/D3039-14, **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. 2014.

ASTM D7264/D7264M, **Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. 2007

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158**: Sistema de tolerâncias e ajustes. Rio de Janeiro, 1995.

BAERE, I., et al. **The Use of Rivets for Electrical Resistance Measurement on Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastics**. Smart Materials and Structures, Vol 16, pp.1821–1828. 2007.

BAKER, A. A. **Composite Materials for Aircraft Structures**. 2. ed. Virginia: AIAA, 2004. 597p.

BARBERO, E. J. **Introduction to composite materials design**. 1. ed. New York: Taylor&Francis, 1999. 336p.

BROUWER W.D, VAN HERPT ECFC. **Vacuum injection moulding for large structural applications**. Composites Part A: applied science and manufacturing, Vol 34, pp. 551 – 558. 2003.

CALLISTER Jr., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. p. 423.

Catálogo Ciject™ ZERO. Disponível em <<http://pdf.nauticexpo.com/pdf/composite-integration/ciject-zero-resin-injection-machine/30022-8116.html>> Acessado em Janeiro de 2014.

Catálogo Composite Integration Ciject™. Disponível em <http://www.composite-integration.co.uk/product_injection_page.php> Acessado em Janeiro de (2014).

Catálogo Magnum Venus Plastech™ Innovator Pro. Disponível em <<http://www.mvpind.com/>> Acessado em Janeiro de 2014.

Catálogo GlasCraft® Spartan III. Disponível em <<http://www.newdesigncomposite.ro/useruploads/images/Instalatie%20de%20injectie%20.pdf>> Acessado em Janeiro de 2014.

Catálogo Radius® 2100cc Pneumatic RTM Injection System. Disponível em <http://www.radiuseng.com/rtm_fc.htm> Acessado em Janeiro de 2014.

Catálogo Ficha técnica do Pistão ISOJET. Disponível em <<http://www.isojet.com/>> Acessado em Janeiro de 2014.

Catálogo Trelleborg®. Disponível em <<http://www.trelleborg.com/pt-br/>> Acessado em Maio de 2014.

Catálogo de Cilindros Pneumáticos Belair®. Disponível em <<http://www.belair.ind.br/belair/index.php>> Acessado em Abril de 2014.

CAVALCANTI, A. M. S. **Desenvolvimento da Capacitação do Processamento de Compósitos por Moldagem de Transferência de Resina.** Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba: 2014. 138p.

CHAUDHARI, R., PICK, M., GEIGER, O., SCHMIDT, D. **Compression RTM – A new process for manufacturing high volume continuous fiber reinforced composites.** 5th International CFK-Valley State Convention. Stadeum Stade. Germany. 2011. 26p.

Código do Sensor de Ultrassom. Disponível em <<http://www.nubiasouza.com.br/sensor-de-distancia-ultra-sonico-e-arduino>> Acessado em Setembro de 2014.

COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials, 2002.

CRISS, JIM M., et al. **Resin Transfer Molding of Phenylethynyl Imides.** 30th International SAMPE Technical Conference. Texas, 1998. pp. 147 – 155.

GARAY, ANDRÉ CECHIN. **Efeito da adição de carbonato de cálcio em compósitos poliméricos moldados por RTM e RTM Light**. Dissertação de Mestrado – Engenharia de Minas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2010. 92p.

GATTI, M. C. A. **Tenacidade à fratura translaminar dinâmica de um laminado híbrido fibra/metal titânio-grafite de grau aeronáutico**. Tese de Doutorado – Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009. 112p.

GEBART, B. R. e STRÖMBECK, L. **Principles of liquid composite molding processing of composites**.

GOSS, T. M. **Panorama e perspectivas da indústria brasileira de compósitos**. Trabalho de conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2010. 42p.

HALME, J. **Development Testing of a Composite Wing Rib**. Dissertação de mestrado – Department of Mechanical Engineering – Helsinki University of Technology. Espoo: 2002. 134p.

HETHERINGTON, R. D. **Precision Metered Multiple Fluid Pumping System**. US Pat. 6.015.268, 18 jan. 2000. 12p.

Huntsman RTM diagram. Disponível em <
<http://www.reinforcedplastics.com/view/27188/rtm-advances-facilitate-mass-production-in-the-automotive-market/>> Acesso em Agosto de 2014.

HSIAO, K. T., ADVANI, S. G. **Flow Sensing and Control Strategies to Address Race-tracking Disturbances in Resin Transfer Molding. part i: Design and Algorithm Development**. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol 35, pp. 1149 – 1159. 2004.

IVES, F. E. **Double-acting Positive Displacement Pump**. N° EP 0451942 A1, 4 de março. 1991. 7p.

JIANG, S., et al. **Optimum arrangement of gate and vent locations for RTM process design using a mesh distance-based approach**. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol 33, pp. 471 – 481. 2002.

Jim M. e John W. **Resin Transfer Molding of Phenylethynyl Imides**. 30th International SAMPE Technical Conference. pp. 147 – 155. 1998.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. 1. ed. Hill, EUA: Mcgraw, 1975.

MATTHEWS, F. L. RAWLINGS, R. D. **Composite Materials: Engineering and Science**. 1. ed. [S.l.]: Chapman & Hall, 2006.

MARIMBONDO, J. F. **Desenvolvimento de uma Metodologia de Projeto de Sistemas Modulares, Aplicada a Unidades de Processamento de Resíduos Domiciliares.** Tese de Doutorado – Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2000. 274p.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e tecnologia.** 1. ed. São Paulo: Artlieber Editora Ltda, 2011. p. 21.

MARTINEZ, C. B. **Estudo da influência do ciclo de cura nas propriedades mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de infusão de resina.** Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos: 2011.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise.** 1. ed. São Paulo: Manole, 2005. 632p.

MEROTTE, J. **Flow analysis with fiber preform deformation during compression resin transfer molding.** Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica - Faculty of the University of Delaware. Delaware: 2010. 159p.

MORREN, G., BOSSUYT, S. e SOL, H. **2D permeability tensor identification of fibrous reinforcements for RTM using an inverse method.** Composite Part A, Vol 39, pp. 1530 – 1536. 2008.

NASCIMENTO, R. L. E. **Produção e Caracterização de Compósitos Inteligentes.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciências dos Materiais – Universidade de Lisboa. Lisboa:

NERY, F. A. C. **Desenvolvimento de uma máquina extrusora de laboratório para fios de metais não- ferrosos.** Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas. São Paulo: 1980. 125p.

PARNAS, R.S., SALEM, A. J., **A Comparison of the Unidirectional and Radial In-Plane Flow of Fluids Through Woven Composite Reinforcements.** Polymer Composites, 1993.14(5): p. 383-394.

PARKER. **Catálogo 1001-8 BR.** Disponível em: <http://parkerstoretaubate.com.br/catalogos/Automacao%20Pneumatica/1001-8BR.pdf>. Acessado em 12/02/2014 às 16:00. 2014. pp. 38 - 50.

PETERHANS, HORST. **Resin Transfer Moulding – RTM.** 2. ed. Santa Catarina: Nova Letra, 2013. pp. 52 – 57.

POTTER, Kevin. **Resin Transferring Molding.** London. Chapman & Hall, 1997.

POTTER, K.D. **The early history of the resin transfer moulding process for aerospace Applications.** Composites: Part A, v. 30, p.619 – 621. 1999.

PIEBER, F. M., et al. **Projetista de máquinas**. 5. ed. São Paulo: FPROVENZA, 1976. 218p.

REID, S.R. ZHO, G. **Impact Behavior of Fibre-Reinforced Composite Materials and Structures**. 1. ed. [S.I.]: CRC Press, 2000.

SILVA, J.M., NUNES, C. Z., FRANCO N. AND GAMBOA P. V., **Damage tolerant cork based composites for aerospace applications**. The Aeronautic Journal, Vol. 15, No. 1171, p. 567-575. 2011.

STEENKAMER, D. A. **The influence of preform design and manufacturing issues on the processing and performance of resin transfer molded composites**. Tese de Doutorado – University of Delaware Center of Composite Materials. Delaware. 1994.

REICHERT JR., R. A. **Improving the properties of room temperature cured polyester resins with enhancers**. Composite Manufacturing, 2007. p.52.

REZENDE, M. C., et al. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. 1. ed. São Paulo: Artlieber Editora, 2011. 396p.

SOEIRA, L. E. **Projeto e elaboração de um dispositivo para remodelagem de fibras como subsistema do processo de enrolamento filamentar**. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de São Paulo. São Paulo: 2009 p. 1 – 34.

SHEARD, J., et al., **Determination of corner and edge permeability in resin transfer molding**. Polymer Composites. Vol 19, pp. 96 – 105. 1998.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 880p.

9. ANEXOS

ANEXO A

Código para o Shield de Ultrassom

Figura A1 – Código para o Sensor de Ultrassom.

```
#include "Ultrasonic.h"
#define echoPin 13 //Pino 13 recebe o pulso do echo
#define trigPin 12 //Pino 12 envia o pulso para gerar o echo
//iniciando a função e passando os pinos
Ultrasonic ultrasonic(12,13);

void setup()
{
    Serial.begin(9600); //inicia a porta serial
    pinMode(echoPin, INPUT); // define o pino 13 como entrada (recebe)
    pinMode(trigPin, OUTPUT); // define o pino 12 como saída (envia)
}

void loop()
{
    //seta o pino 12 com um pulso baixo "LOW" ou desligado ou ainda 0
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    // delay de 2 microssegundos
    delayMicroseconds(2);
    //seta o pino 12 com pulso alto "HIGH" ou ligado ou ainda 1
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    //delay de 10 microssegundos
    delayMicroseconds(10);
    //seta o pino 12 com pulso baixo novamente
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    // função Ranging, faz a conversão do tempo de
    //resposta do echo em centímetros, e armazena
    //na variavel distancia
    int distancia = (ultrasonic.Ranging(CM));

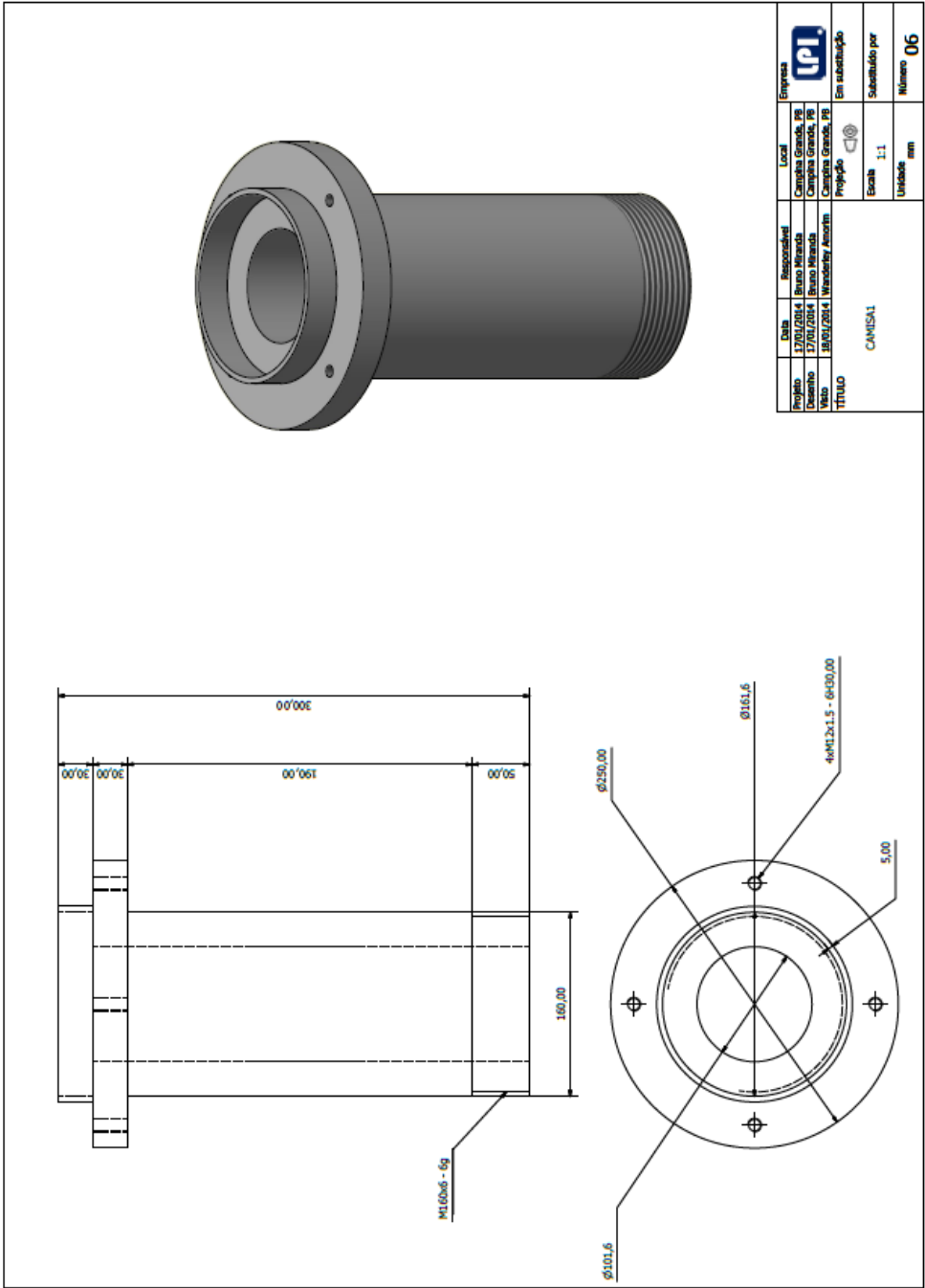
    Serial.print("Distancia em CM: ");
    Serial.println(distancia);
    delay(1000); //espera 1 segundo para fazer a leitura novamente
}
```

Fonte: www.nubiasouza.com.br, 2014.

ANEXO B

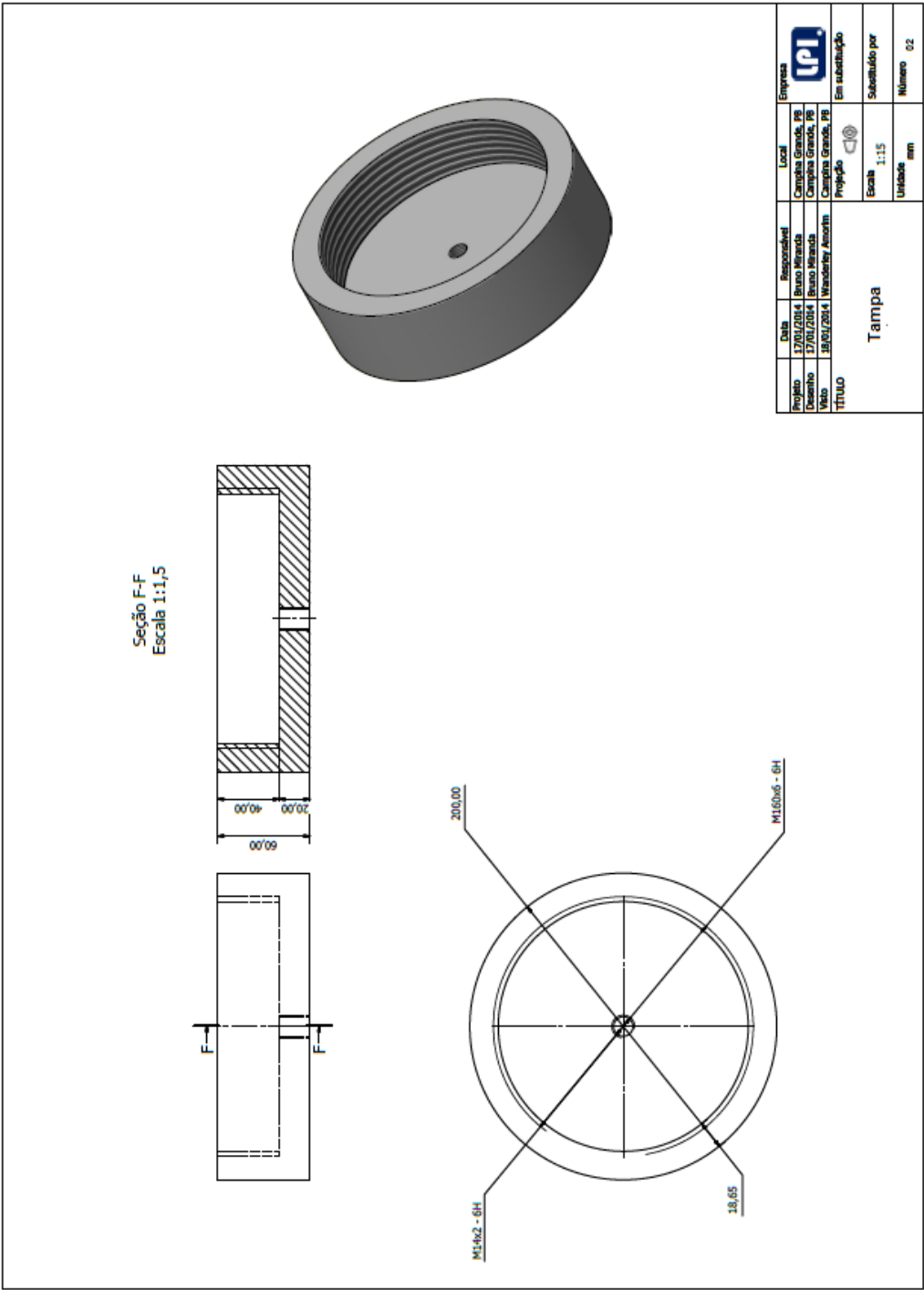
Projeto Detalhado do Equipamento de Injeção de Resina por RTM

Figura B1 – Camisa.



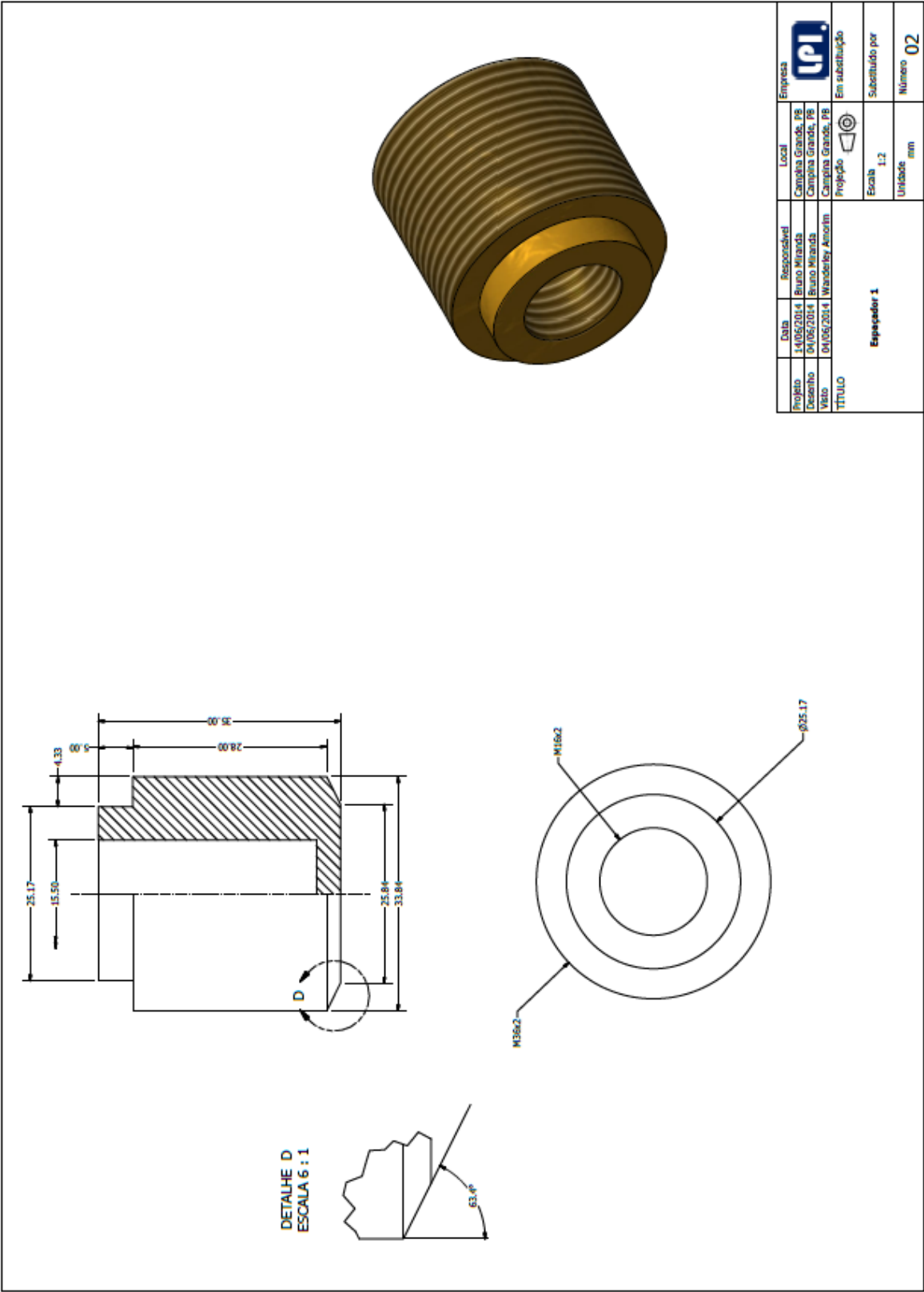
Fonte: Autoria Própria.

Figura B2 – Tampa.



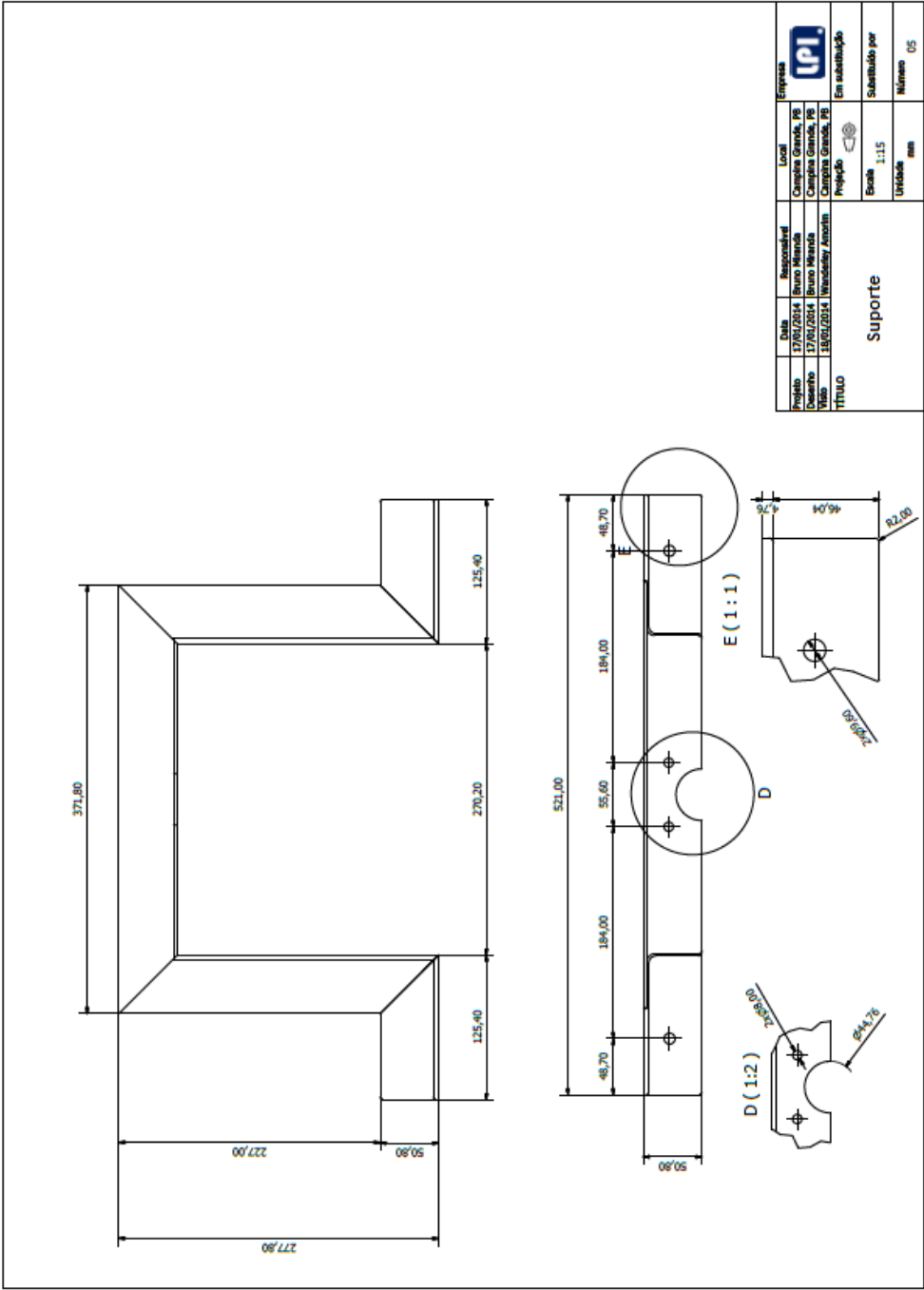
Fonte: Autoria Própria.

Figura B4 – Bucha do Êmbolo.



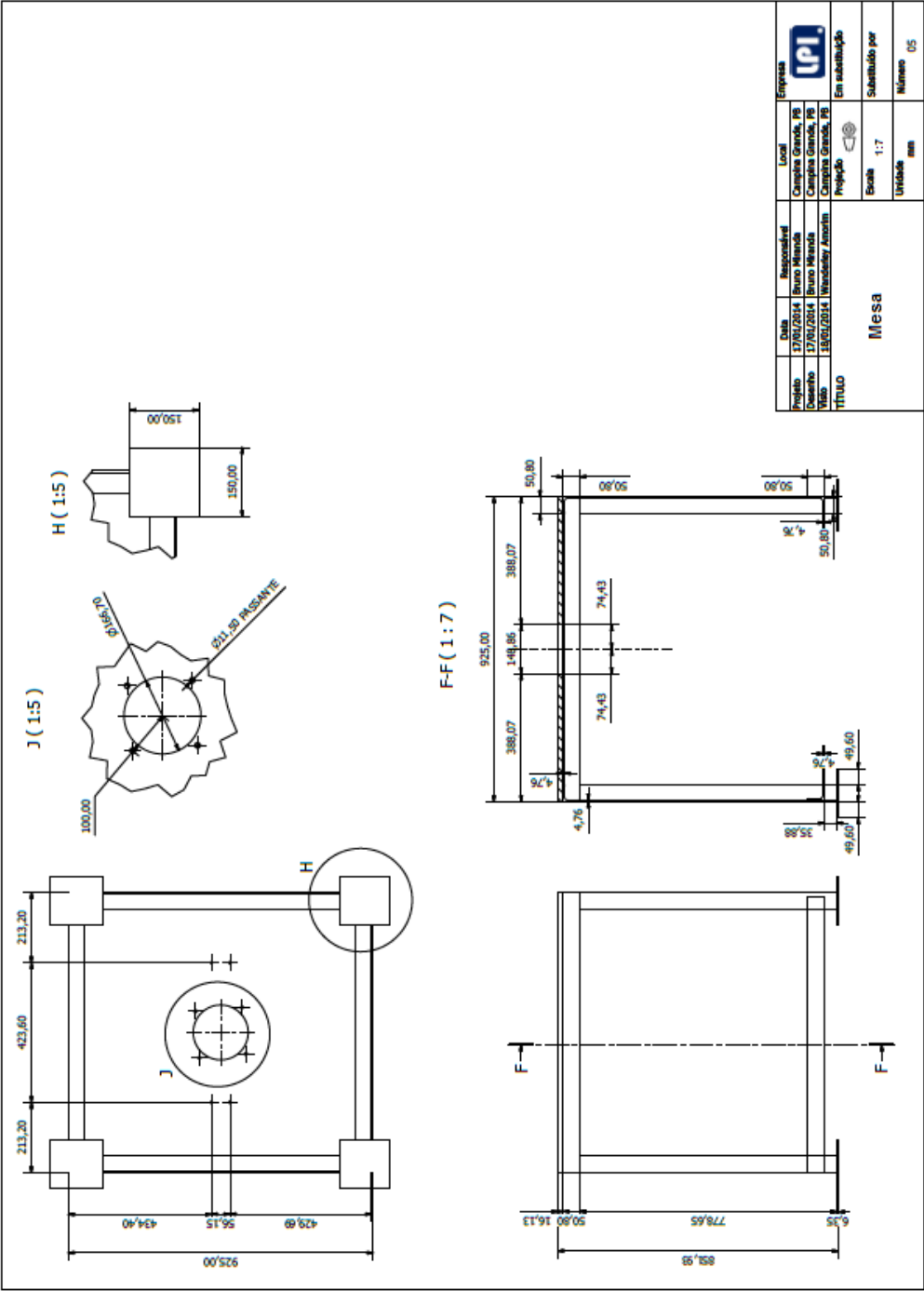
Fonte: Autoria Própria.

Figura B5 – Suporte do Cilindro.



Fonte: Autoria Própria.

Figura B6 – Mesa.

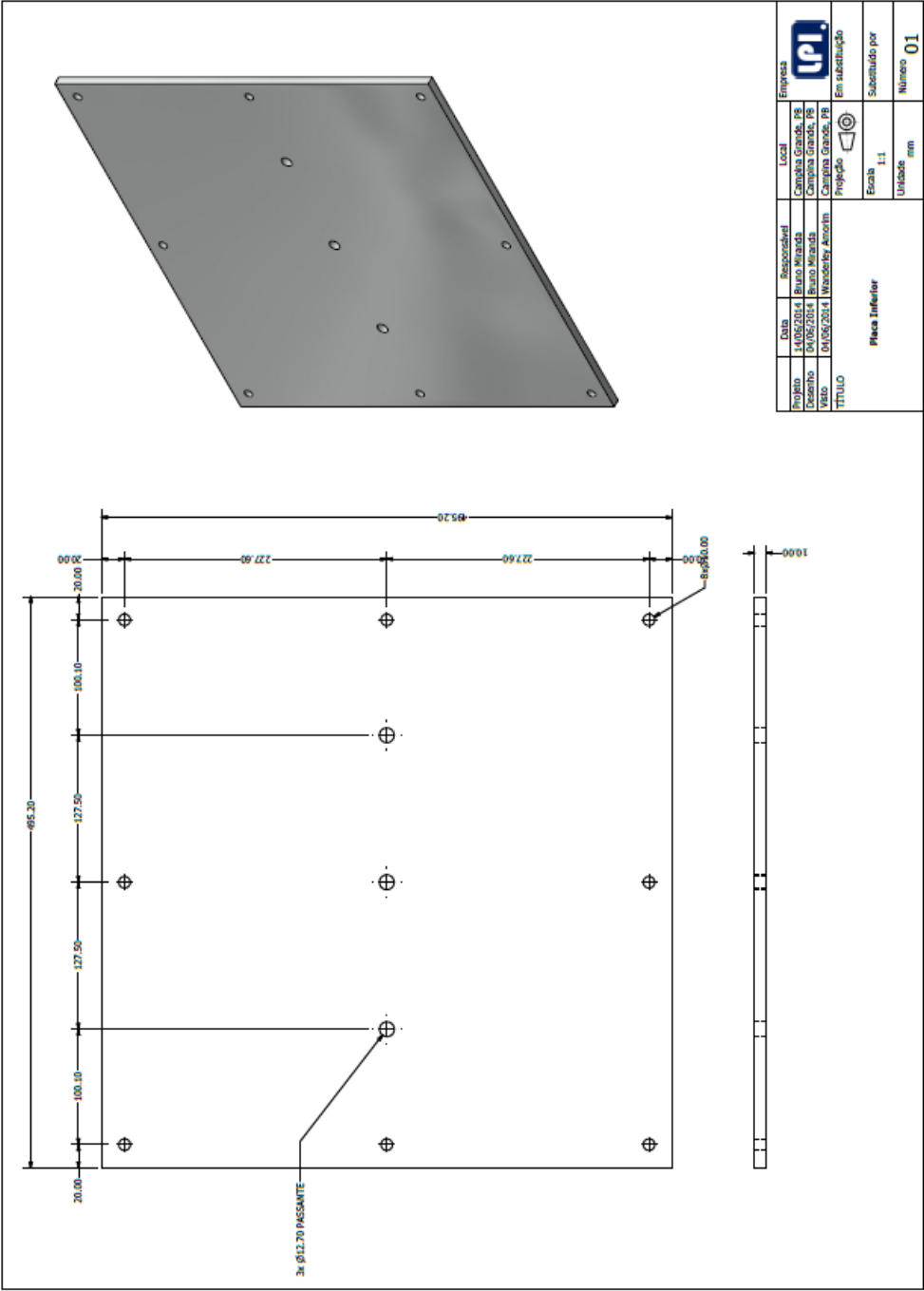


Fonte: Autoria Própria.

ANEXO C

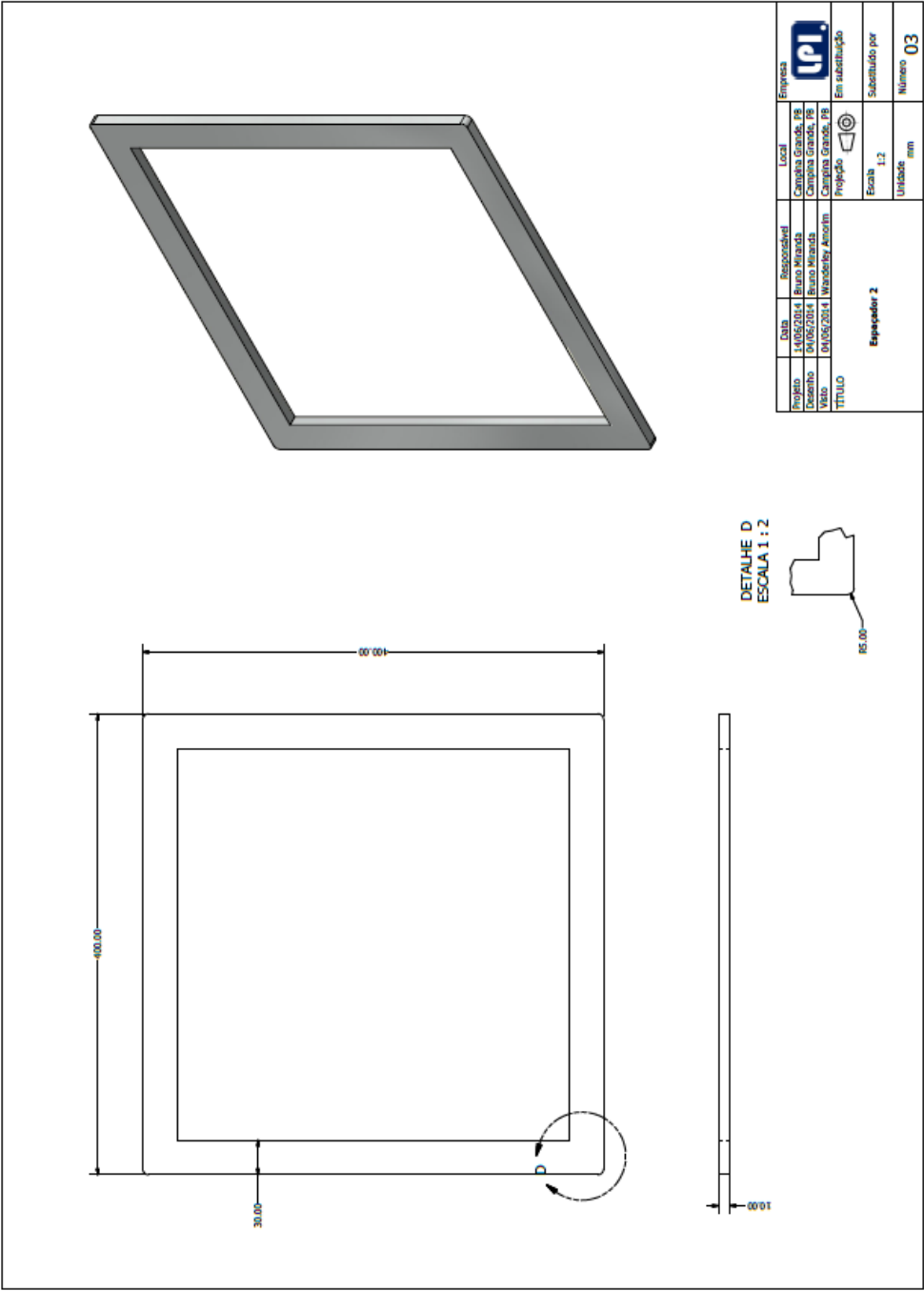
Desenhos Técnicos do Molde

Figura C1 – Placa Inferior do Molde.



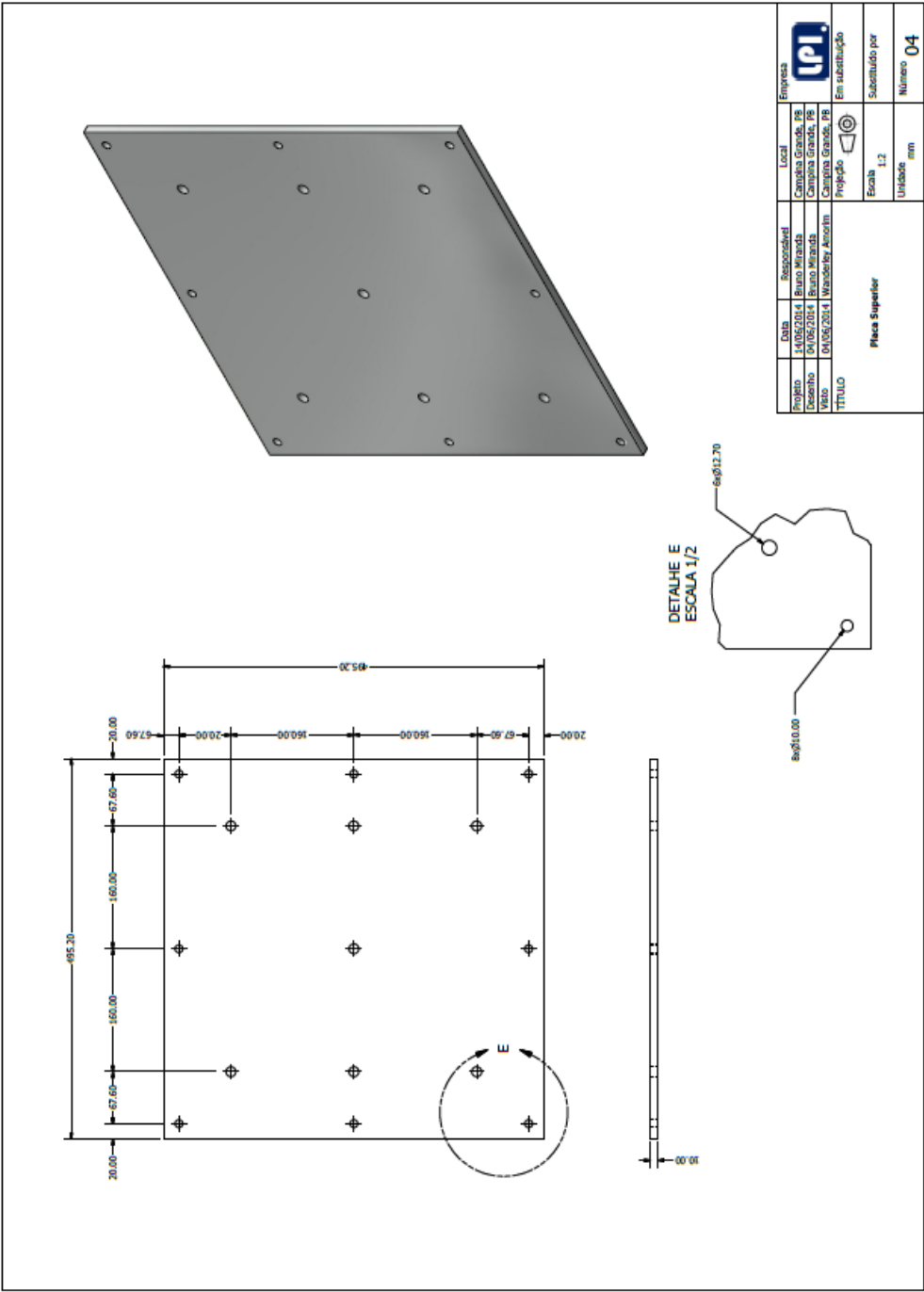
Fonte: Autoria Própria.

Figura C3 – Espaçador 2.



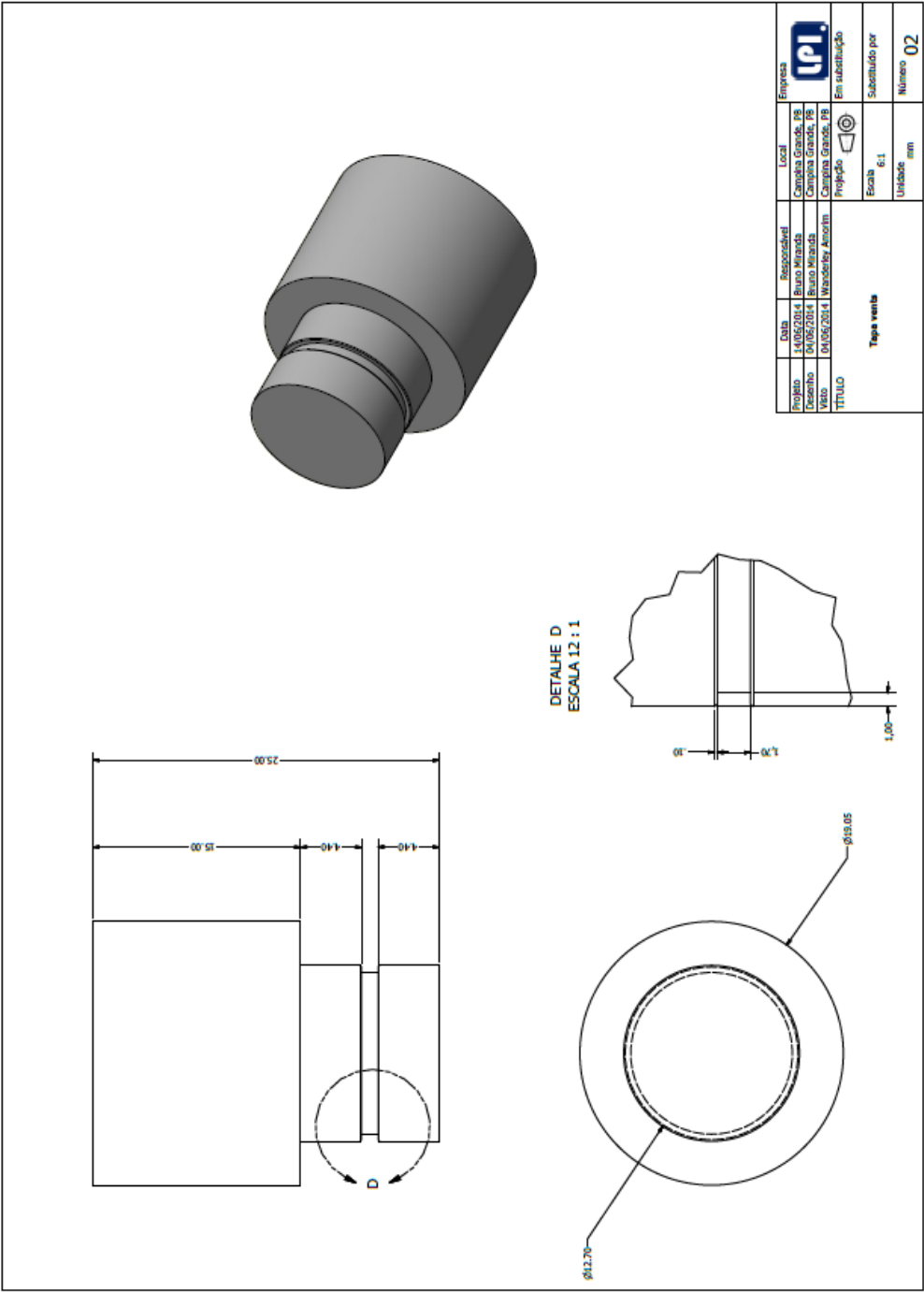
Fonte: Autoria Própria.

Figura C4 – Placa Superior.



Fonte: Autoria Própria.

Figura C5 – Tapa das Saídas.

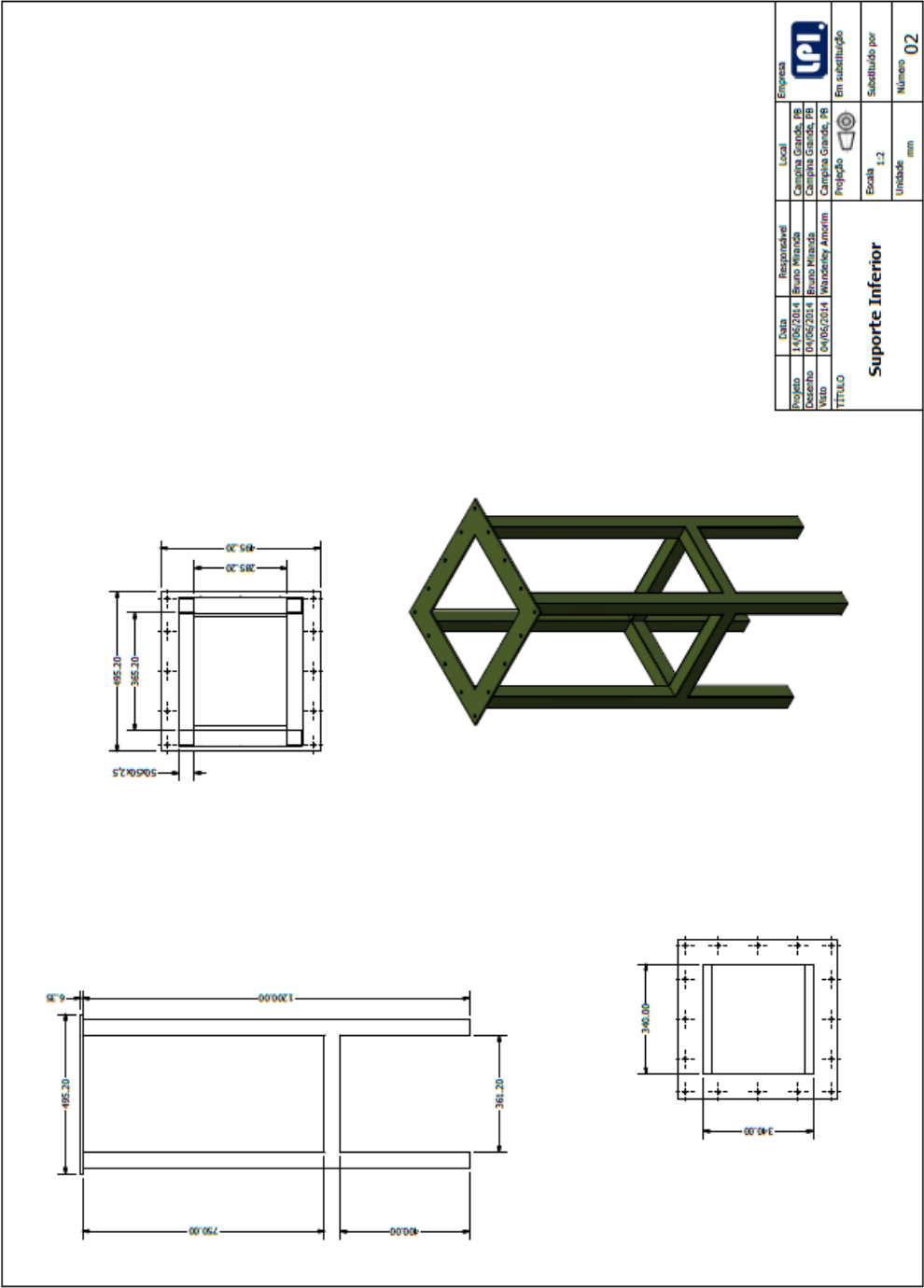


Fonte: Autoria Própria.

ANEXO D

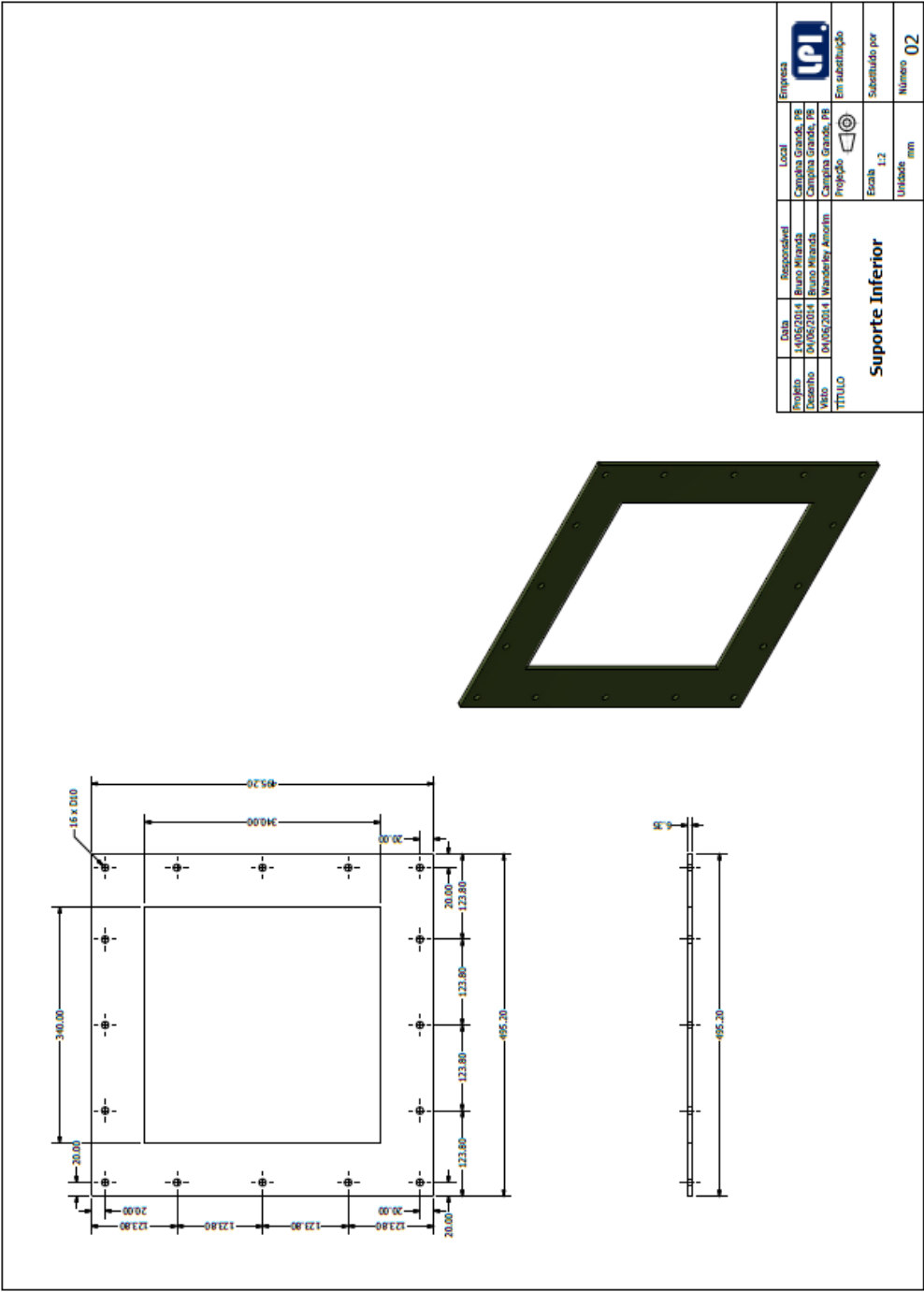
Desenho Técnico do Suporte do Molde

Figura D1 – Suporte Inferior.



Fonte: Autoria Própria.

Figura D2 – Suporte Superior.

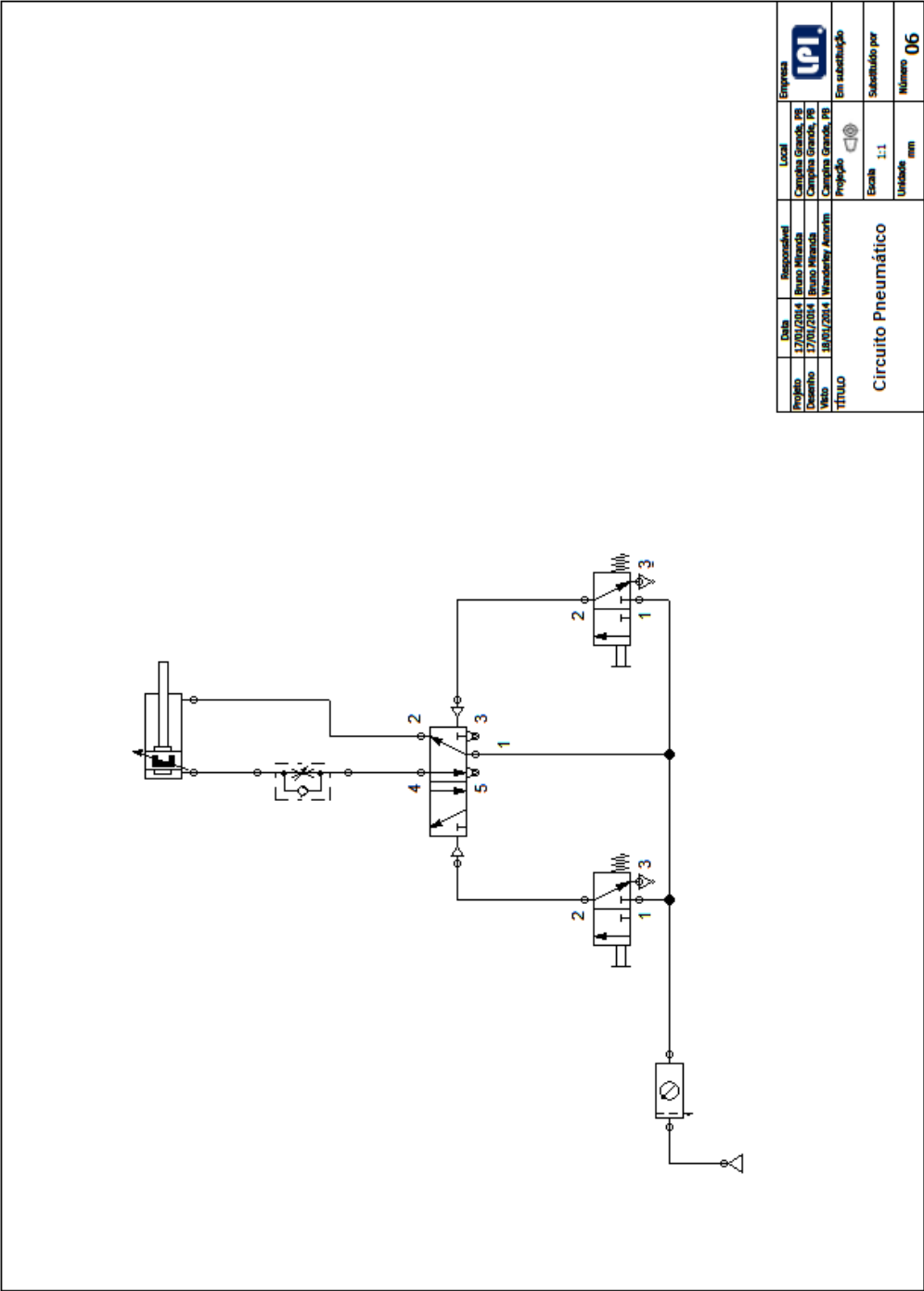


Fonte: Autoria Própria.

ANEXO E

Circuito Pneumático

Figura E1 – Circuito Pneumático.




Fonte: Autoria Própria.

ANEXO F

Datasheets

Figura F1 – Propriedades do Nylon 6.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS			
PROPRIEDADES			
FÍSICAS	Densidade (g/cm³)	D53479	1,13
	Calor específico (cal°/C°g)	D53417	0,4
	Absorção de água (%)	D53715	3
MECÂNICAS	Resistência à Tração (Mpa)	D53455	60
	Alongamento na Ruptura (%)	D53457	70 a 200
	Módulo de Elasticidade em Tração (Mpa)	D53455	1800
	Módulo de Elasticidade em Flexão (Mpa)	D53455	2800
	Resistência ao Impacto	D256	50
	IZOD (J/m)	D785	R100
	Dureza Rockwell	-	-
	Coef. De Atrito de Deslize p = 0,05N/mm² v = 0,6m/s Contra aço, temp. e retif.	-	0,38-0,45
	Ponto de Fusão (°C)	-	220
	Condutividade Térmica (W/m.K)	D52612	0,23
TÉRMICAS	Expansão Térmica Linear (10⁻⁵/K)	D52328	7
	Temperatura de Uso Contínuo (°C)	-	-40 à 100
	Relação de Inflamabilidade	UL 94	HB
ELÉTRICAS	Rigidez Dielétrica (KV/mm)	D53481	20-50
	Constante Dielétrica até 1KHz	D53483	3,7
	Fator de Dissipação até 1KHz	D53483	0,02
	Resistividade Volumétrica (Ohm/cm A 22,8°C 50% RH (ohm/cm)	D53482	10"
QUÍMICAS	Resistência a ácidos fracos	D543	Boa
	Resistência a ácidos fortes	D543	Atacado
	Resistência a bases fracas	D543	Boa
	Resistência a bases fortes	D543	Boa
	Resistência a solventes orgânicos	D543	Atacado por fenóis e formol

Fonte: www.nitaplast.com.br, (2014).

Figura F2 – Características do Produto.

Ultrasonic Ranging Module HC - SR04

Product features:

Ultrasonic ranging module HC - SR04 provides 2cm - 400cm non-contact measurement function, the ranging accuracy can reach to 3mm. The modules includes ultrasonic transmitters, receiver and control circuit. The basic principle of work:

- (1) Using IO trigger for at least 10us high level signal,
- (2) The Module automatically sends eight 40 kHz and detect whether there is a pulse signal back.
- (3) IF the signal back, through high level , time of high output IO duration is the time from sending ultrasonic to returning.

Test distance = (high level time×velocity of sound (340M/S) / 2,

Wire connecting direct as following:

- 5V Supply
- Trigger Pulse Input
- Echo Pulse Output
- 0V Ground

Electric Parameter

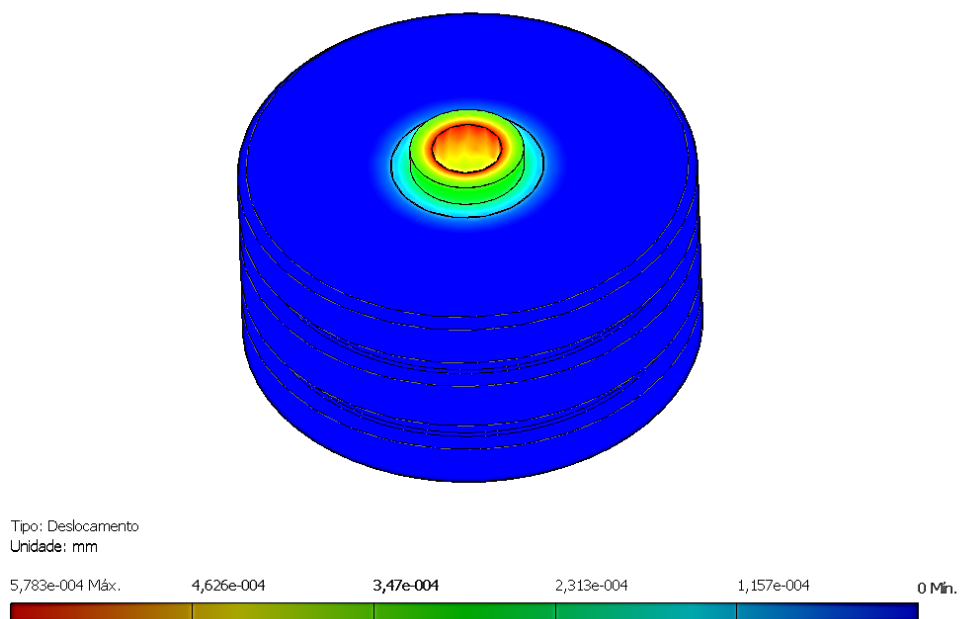
Working Voltage	DC 5 V
Working Current	15mA
Working Frequency	40Hz
Max Range	4m
Min Range	2cm
MeasuringAngle	15 degree
Trigger Input Signal	10uS TTL pulse
Echo Output Signal	Input TTL lever signal and the range in proportion
Dimension	45*20*15mm

Fonte: Autoria Própria.

ANEXO G

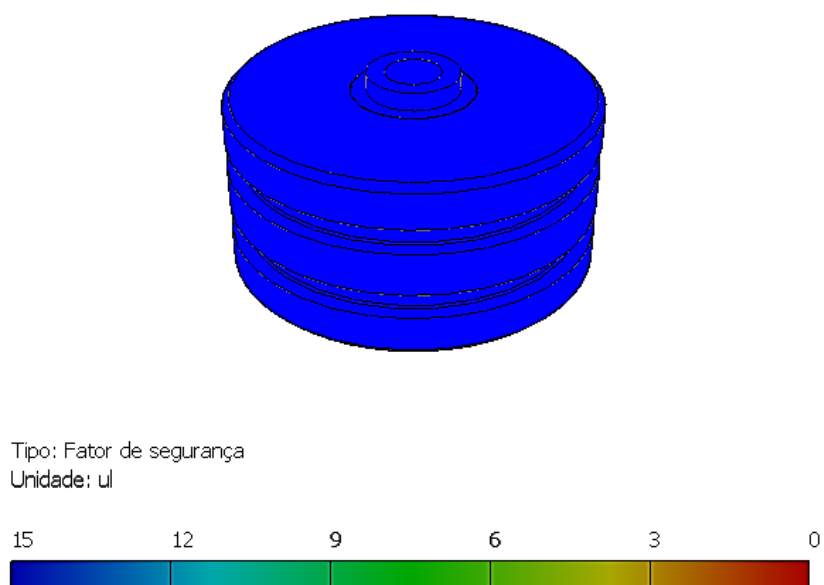
Resultados das Simulações Numéricas

Figura G1 – Deslocamento do Êmbolo.



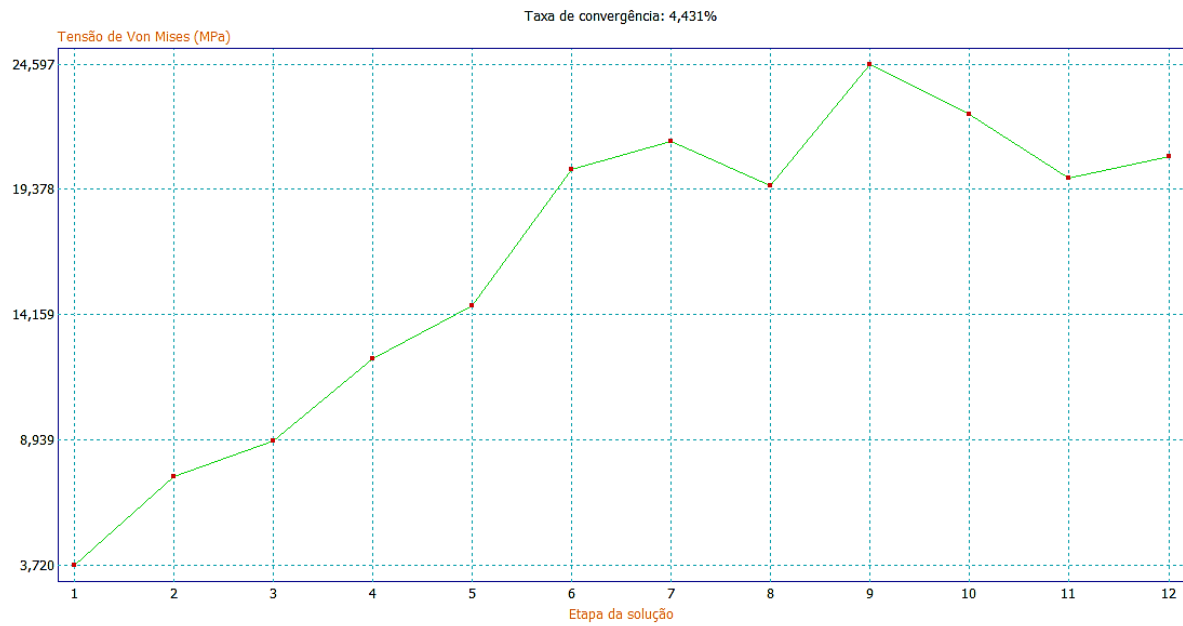
Fonte: Autoria Própria.

Figura G2 – Fator de Segurança do Êmbolo.



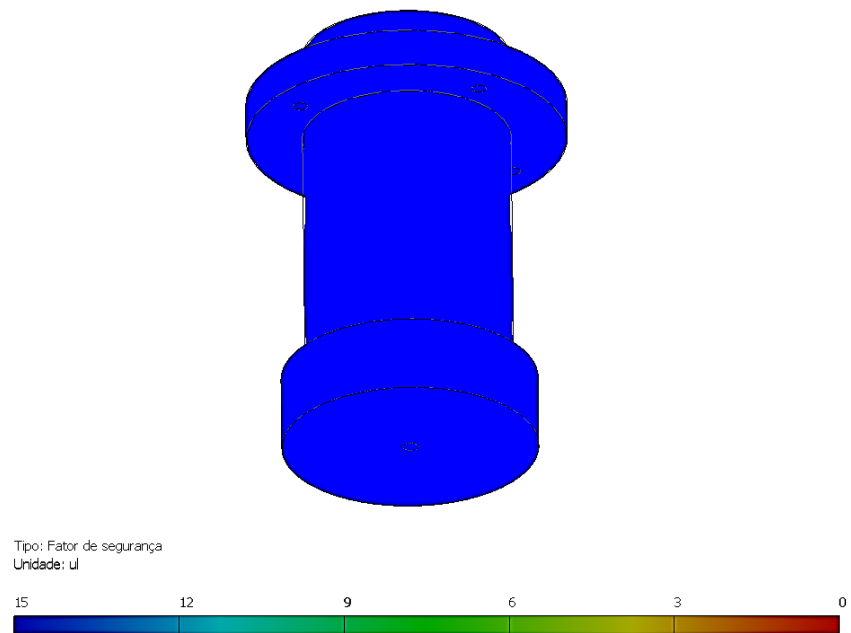
Fonte: Autoria Própria.

Figura G3 – Convergência de Solução da Simulação do Êmbolo.



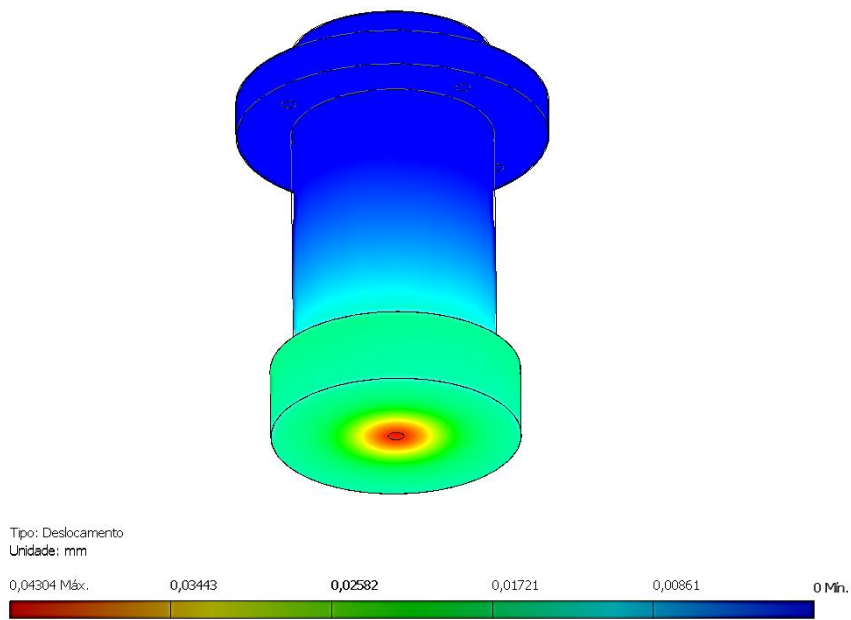
Fonte: Autoria Própria.

Figura G4 – Deslocamento da Bomba.



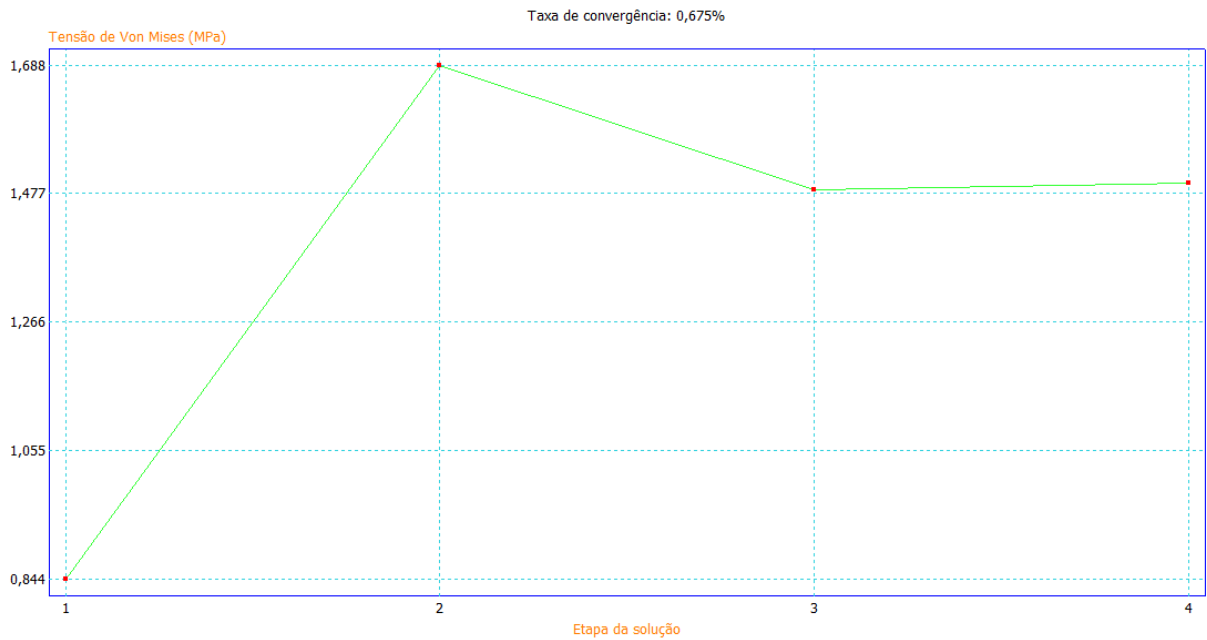
Fonte: Autoria Própria.

Figura G5 – Fator de Segurança da Bomba.



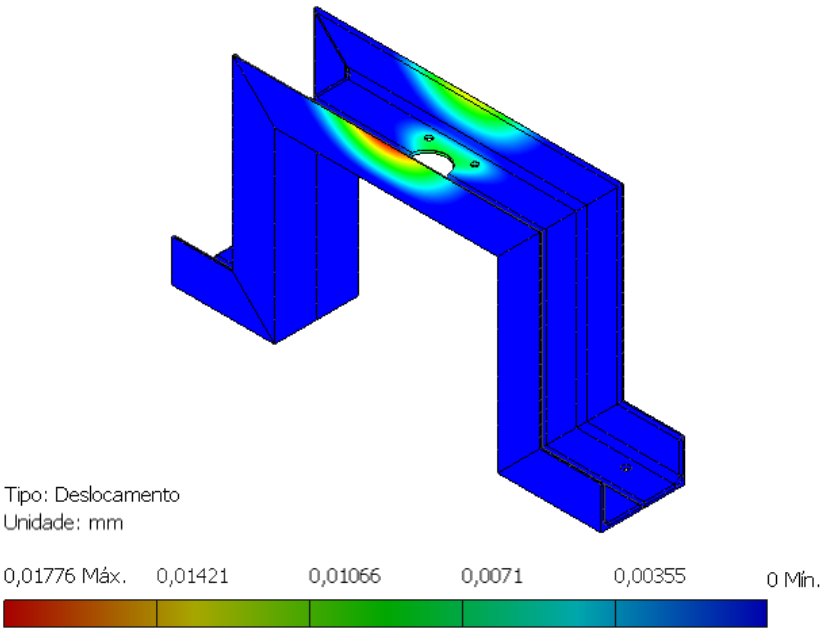
Fonte: Autoria Própria.

Figura G6 – Convergência de Solução da Simulação da Bomba.



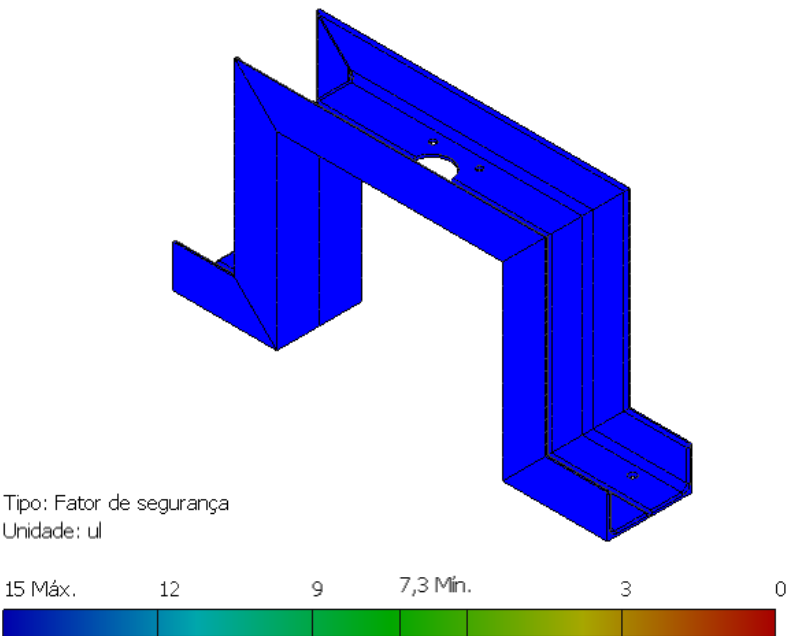
Fonte: Autoria Própria.

Figura G7 – Deslocamento do Suporte.



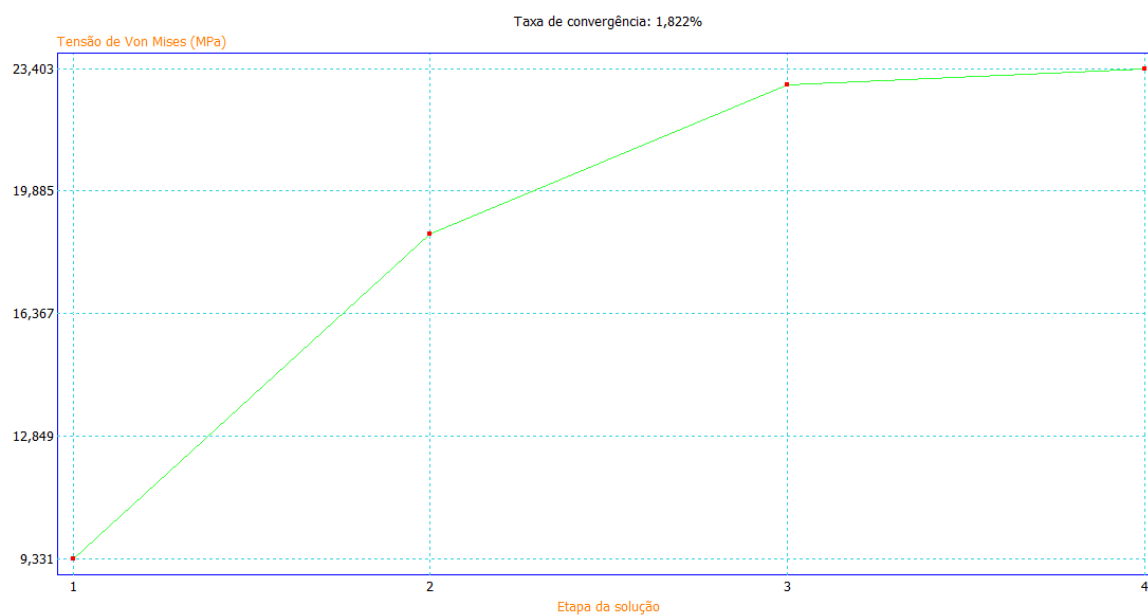
Fonte: Autoria Própria.

Figura G8 – Fator de Segurança do Suporte.



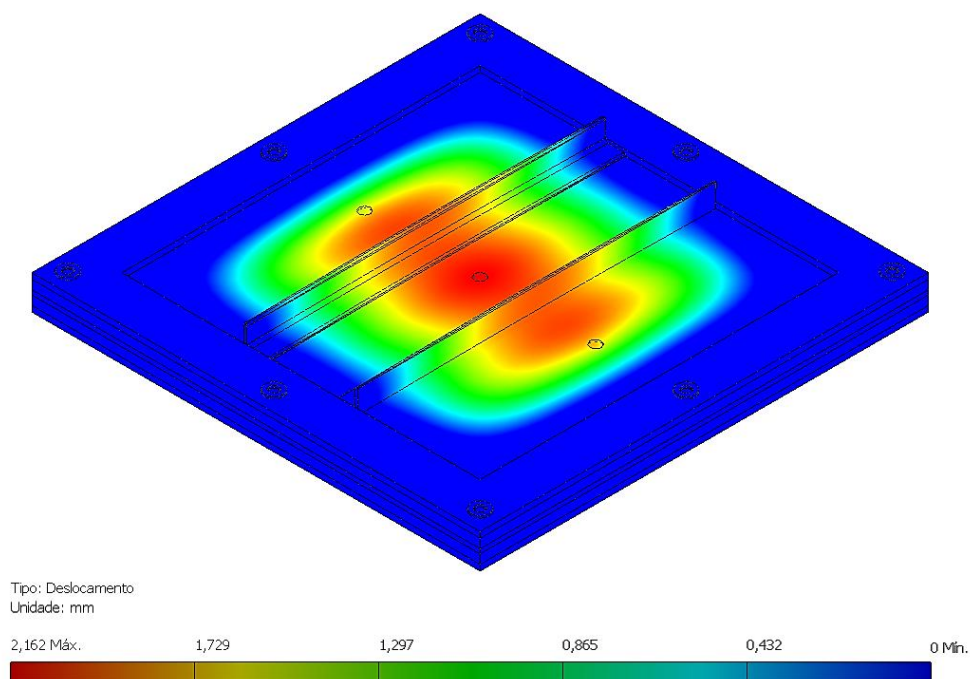
Fonte: Autoria Própria.

Figura G9 – Convergência da Solução da Simulação do Suporte.



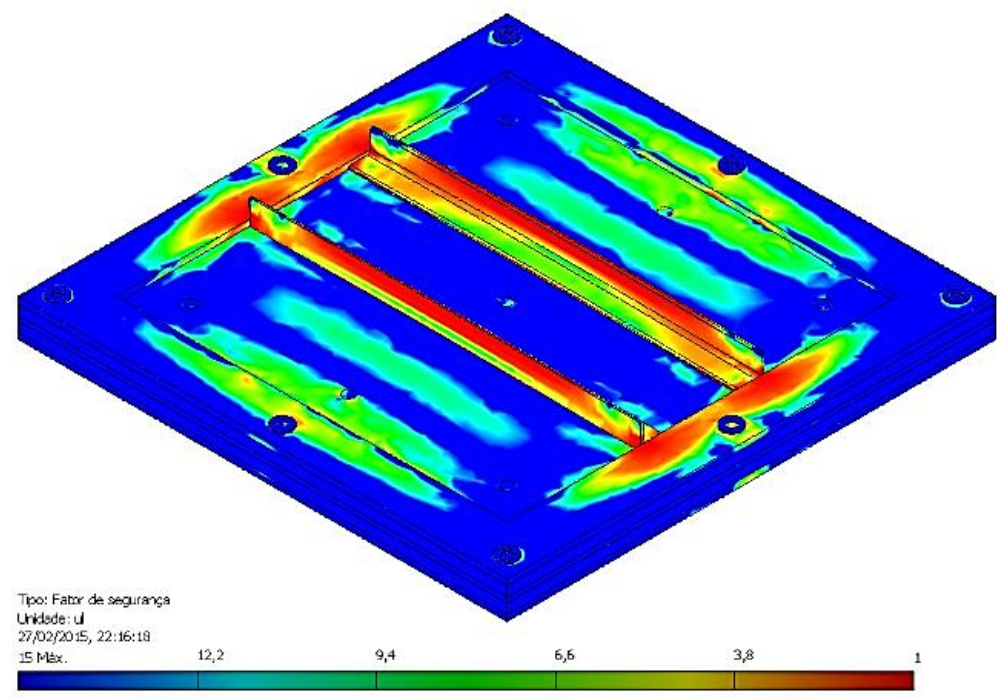
Fonte: Autoria Própria.

Figura G10 – Deslocamento do Molde.



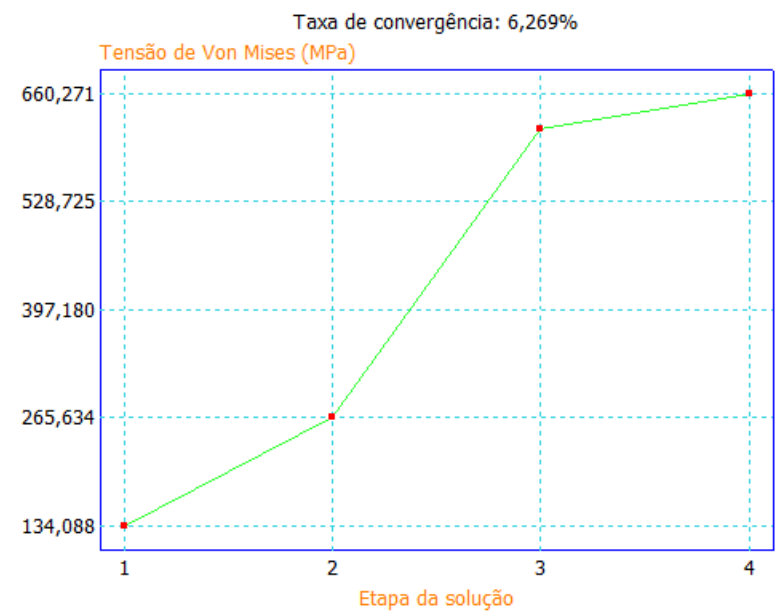
Fonte: Autoria Própria.

Figura G11 – Fator de Segurança do Molde.



Fonte: Autoria Própria.

Figura G12 – Convergência da Solução da Simulação do Molde.

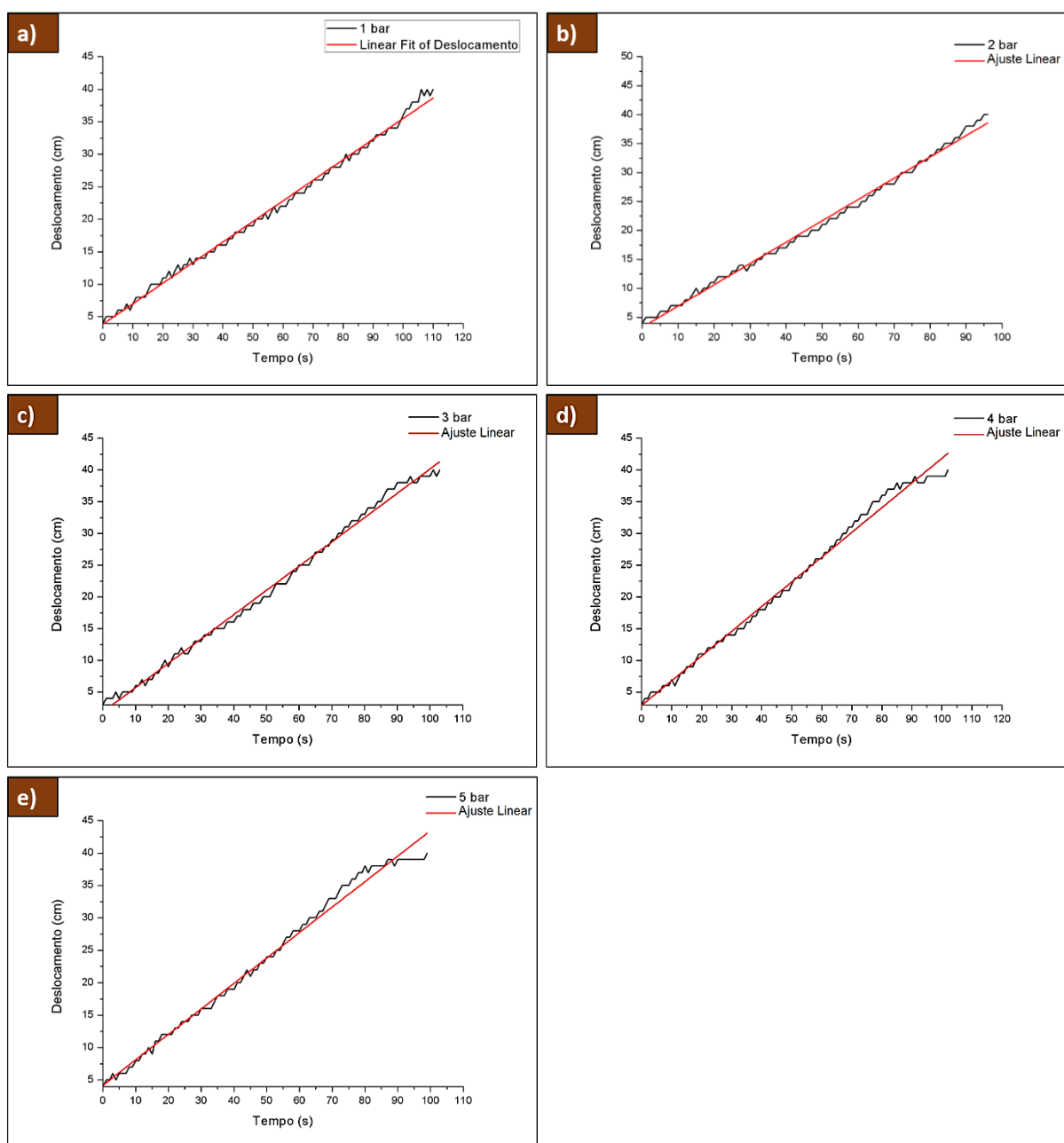


Fonte: Autoria Própria.

ANEXO H

Resultados dos Ensaio de Velocidade.

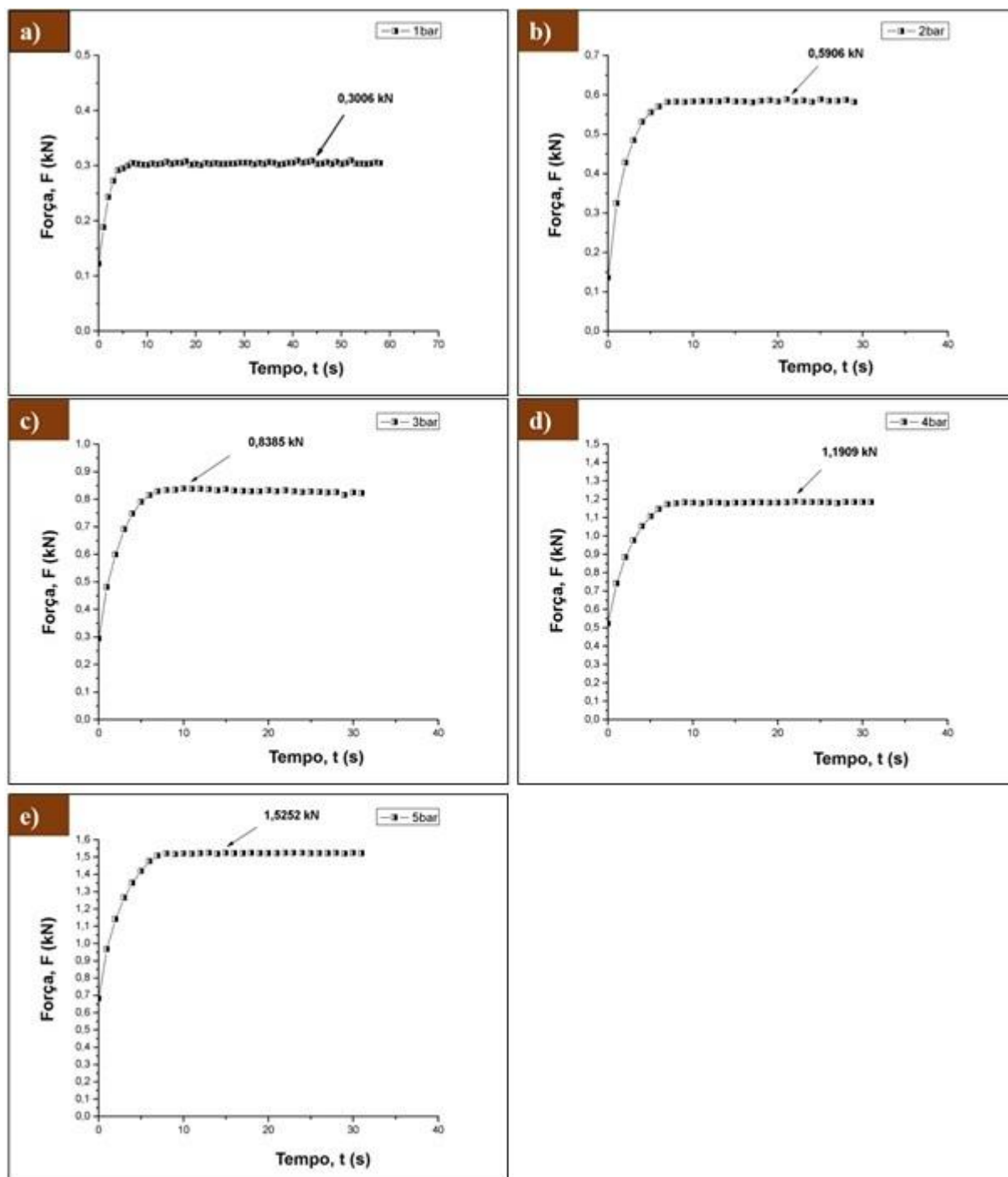
Figura H1 – Perfis do Deslocamento do Cilindro pelo tempo: a) 1bar, b) 2bar, c) 3bar, d) 4 bar e d) 5bar.



Fonte: Autoria Própria.

Resultados dos Ensaio de Força.

Figura H2 – Perfis do Deslocamento do Cilindro pelo tempo: a) 1bar, b) 2bar, c) 3bar, d) 4bar e d) 6bar.

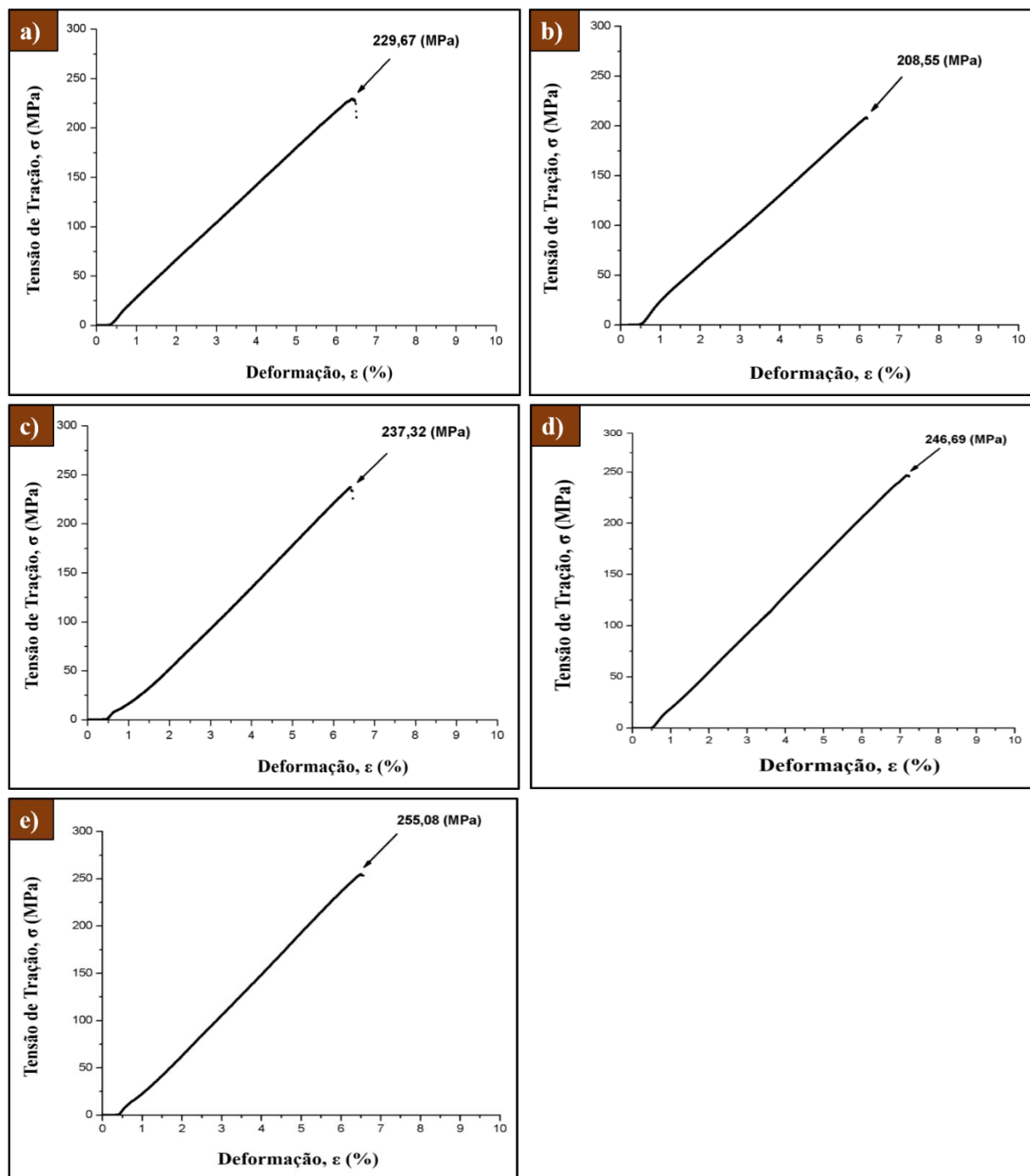


Fonte: Autoria Própria.

ANEXO I

Resultados dos Ensaio de Tração.

Figura I1 - Gráficos da Tensão de Tração (MPa) x Deformação (%) da Placa em Tecido: a) CP 01, b) CP 02, c) CP 03, d) CP 04 e e) CP 05.

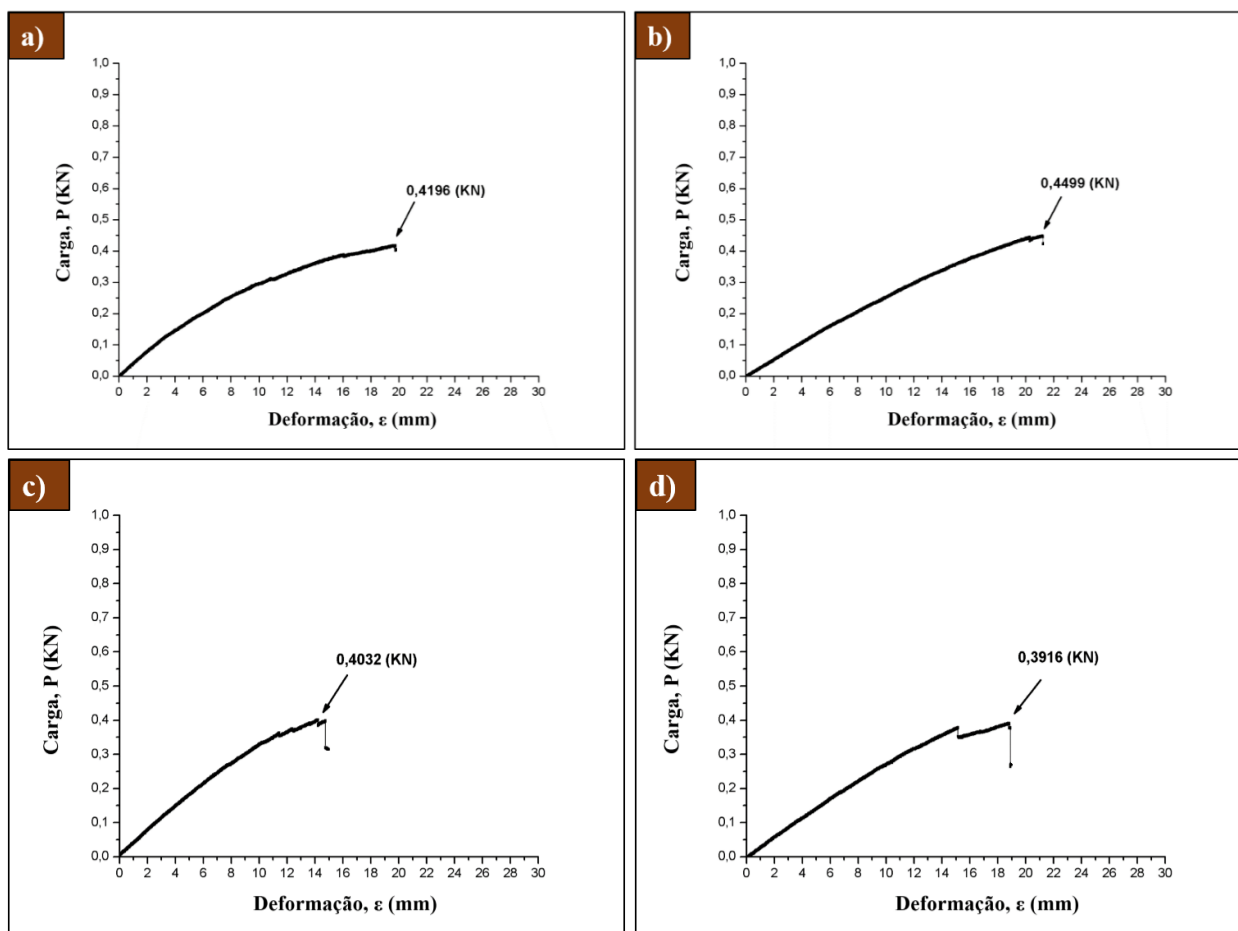


Fonte: Autoria Própria.

ANEXO J

Resultados dos Ensaio de Flexão

Figura J1 - Gráficos da Carga (KN) x Deformação (mm) da Placa em Tecido: a) CP 01, b) CP 02, c) CP 03, d) e CP 04.



Fonte: Autoria Própria.

ANEXO K

Tabelas com os ajustes das curvas.

Figura 16 – Tabela de Ajuste da Velocidade.

Equation	$y = a - b \cdot \ln(x+c)$		
Adj. R-Square	0,99184		
		Value	Standard Error
B	a	0,36536	0,00357
B	b	-0,02184	0,00282
B	c	-0,89347	0,05034

Fonte: Autoria Própria.

Figura 17 – Tabela de ajuste da potência.

Equation	$y = a + b \cdot x$		
Adj. R-Square	0,99739		
		Value	Standard Error
B	Intercept	-0,32492	0,11001
B	Slope	1,2345	0,02825

Fonte: Autoria Própria.